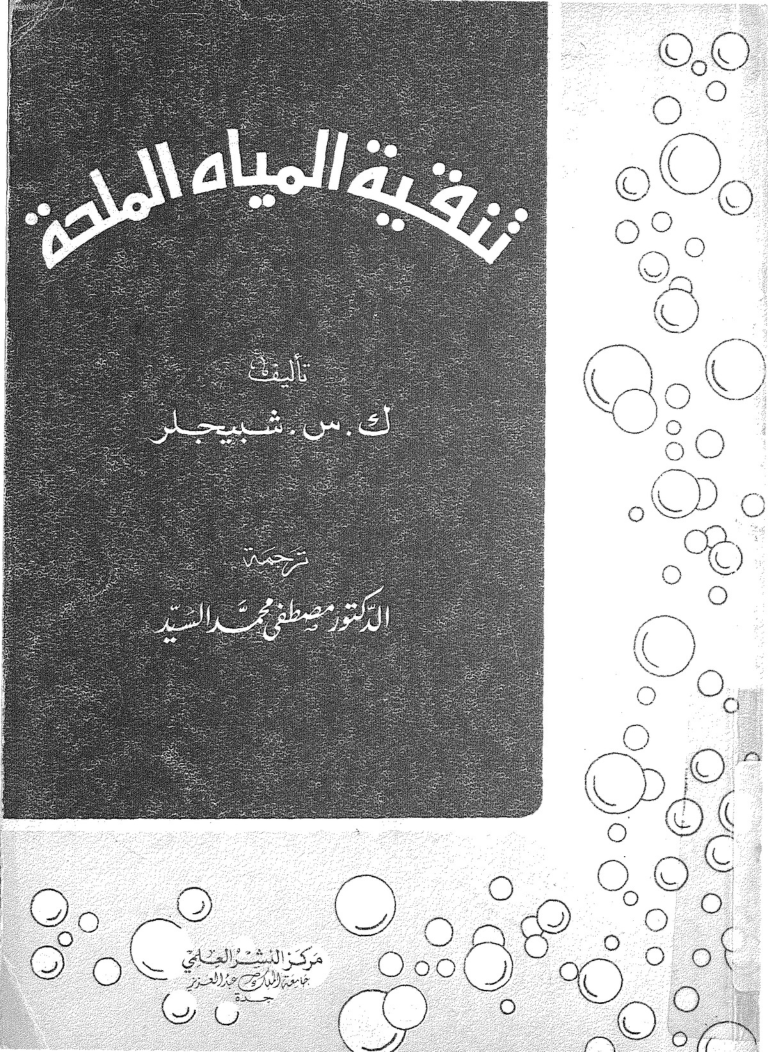
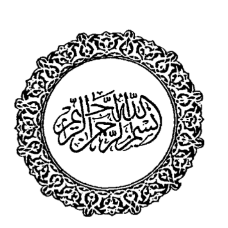

تنقية المياه الملحة
تأليف
ك . س . شبيجلر
ترجمة
الدكتور مصطفى محمد السيد
مركز النشر العلمي
جامعة الملك عبد العزيز
جدة





تأليف

ك. س. شبيجلر

كلية الهندسة - جامعة كاليفورنيا

بيركلي - الولايات المتحدة الأمريكية

ترجمة

الدكتور مصطفى محمد السيد

أستاذ الهندسة الحرارية - كلية الهندسة

جامعة الملك عبدالعزيز - جدة - المملكة العربية السعودية

مركز النشر العلمي

جامعة الملك عبدالعزيز

ص ب ١٥٤٠ - جدة ٢١٤٤١

المملكة العربية السعودية

الطبعة الأولى : ١٤٠٧هـ (١٩٨٧م) .

فهرسة عمادة شؤون المكتبات – جامعة الملك عبد العزيز

شبيجلر ، ك . س .

تنقية المياه الملحة = Salt water purification/ ك . س . شبيجلر ، ترجمة مصطفى محمد السيد . – جدة : جامعة الملك عبد العزيز – مركز النشر العلمي ، ١٤٠٧هـ/١٩٨٧م .

يشتمل على كشاف ، ثبت بالمصطلحات أنجليزى – عربي .

١ . مياه البحر ، إزالة ملوحة . ٢ . المياه – تنقية .
أ . السيد ، مصطفى محمد (مترجم) . ب . العنوان .
جـ . العنوان : Salt water purification .
٦٢٨٫١٦٧

مطابع جامعة الملك عبد العزيز

بسم الله الرحمن الرحيم

وَهُوَ الَّذِى مَرَجَ الْبَحْرَيْنِ هَذَا عَذْبٌ فُرَاتٌ وَهَذَا مِلْحٌ أُجَاجٌ وَجَعَلَ بَيْنَهُمَا بَرْزَخاً وَحِجْراً مَحْجُوراً .

صدق الله العظيم

سورة الفرقان (الآية ٥٣)

تقديم الترجمة

شهدت الجزيرة العربية في الحقبة الأخيرة نموا سريعا في احتياجات المياه العذبة نتيجة للنهضة الحضارية والصناعية والزراعية التي تعيشها الجزيرة هذه الأيام . ونظراً للموقع الجغرافي للجزيرة العربية ، الذي تندر فيه المياه العذبة – فيما عدا بعض الأماكن القليلة التي توجد بها المياه الجوفية – كان لابد من قيام صناعة كبرى لإعذاب مياه البحر لتدبير الاحتياج المتزايد من المياه العذبة .

ولقد أصبحت المملكة العربية السعودية أكبر منتج للمياه العذبة بإزالة ملوحة المياه في العالم ، ونتج عن قيام هذه الصناعة العملاقة عمل عدة آلاف من المواطنين في مجال إزالة الملوحة سواء في الأعمال الفنية أو الإدارية أو في اقتصاديات إنتاج الماء . ولقد أضحى من الضروري توفير المراجع العربية في مجال إعذاب المياه الملحة حتى يتيسر لهؤلاء العاملين الإلمام بالجوانب العديدة لهذه الصناعة ، مما يساعدهم على اتخاذ القرارات الصحيحة للتخطيط لإنشاء محطات جديدة أو لقيام المحطات الحالية بعملها بكفاءة عالية .

والكتاب الحالي يقدم عرضاً موجزاً – دون إخلال بالأسس – لطرق إزالة ملوحة المياه الملحة . وإننا إذ نُقدم هذا الكتاب إلى القارىء العربي لنسأل الله أن ينفع به القراء .

وفي هذا المقام ، أود أن أشكر الزملاء بكلية الهندسة بجامعة الملك عبد العزيز على المساعدات الكثيرة التي قدموها لي لإتمام هذا العمل ، وأخص بالشكر المهندس محمد شكري جلال والأستاذ عبد السلام محمد خضير لإعداد الرسومات الخاصة بالكتاب والسيد فرحات محمد مصطفى شوري للساعات الطوال التي أمضاها في نسخ الكتاب وتصحيحه بصبر ودون ملل . كذلك أود أن أشكر المهندس نبيل عباس عبد الرازق للمراجعة اللغوية للكتاب ، والأستاذ فؤاد عبد العال لمراجعة الكتاب لإعداده في الصورة النهائية للنشر .

جدة – صفر ١٤٠٦هـ
أكتوبر ١٩٨٥م

مصطفى محمد السيد

تقـديـم

هذا كتاب تمهيدي للمستجدين في علم إزالة الملوحة . ولقد كان من نتيجة تنمية المناطق القاحلة ، بالإضافة إلى الزيادة الهائلة في استخدام المياه بالمدن في جميع أنحاء العالم ، أن أصبح هناك عجز في المياه العذبة بالكميات المطلوبة . وعلى مدى العشرين عاماً الماضية ، كان هناك تطور ملحوظ في علم وتقنية إعذاب المياه . وفي أحوال كثيرة ، يلزم لرجال السياسة والعلماء والاقتصاديين والمهندسين اتخاذ القرارات المتعلقة بهذا المجال . وفي معظم الأحوال ، ترتبط هذه القرارات باستهلاك كميات كبيرة من الطاقة أو بمقدار هائل من رؤوس الأموال المستثمرة . وبهذا الكتاب ، نأمل أن يتمكن المستجدون في هذا العلم من تحصيل خلفية كافية عن أسس فهم مصطلحات المادة تُرشدهم خلال الكتابات الكثيرة جدا والمتنوعة لهذا العلم ، وتُمكِّنهم من المراحل الأولى للقراءة .

ولتحويل الماء الملح إلى ماء عذب ، يتطلب الأمر استهلاك طاقة مفيدة ، أي طاقة يمكن استخدامها كشغل ميكانيكي أو كهربائي . وبناء على ذلك ، فإن مشاكل إزالة ملوحة المياه ترتبط بمصادر القدرة . بالإضافة إلى هذا ، فإن تكلفة المعدات لها نصيب كبير وهام في تحديد اقتصاديات إزالة ملوحة المياه . وإنشاء محطة إزالة ملوحة تنتج مياهاً جيدة وتستهلك الطاقة بكفاءة عالية يتطلب مهارات هندسية ملحوظة ، بالإضافة إلى العديد من أجهزة التحكم المتقدمة . ونظرا للحاجة المعتادة للماء واستهلاكه بكميات كبيرة ، فإن إنشاء محطات إزالة ملوحة المياه يشتمل على تقنيات جيدة التطوير ، وعلى استخدام كميات هائلة من المواد الموثوق بها والباهظة التكاليف نسبيا ، كالسبائك الخاصة والبوليمرات على سبيل المثال . وفي العادة ، فإنه لمعدل إنتاج معين ، يُمكن تصغير حجم المحطة إذا سُمح بزيادة استهلاك القدرة ، والعكس بالعكس . لذا يلزم عند التخطيط لإنشاء محطات إزالة الملوحة – بالإضافة إلى الاعتبارات السياسية والمدنية – الموازنة بين تكاليف استهلاك القدرة وتكاليف رأس المال . ويتغير كل من هذين العاملين مع تغير الظروف المحلية والزمن . ولإجراء هذه الموازنة الدقيقة والحساسة يلزم توافر بعض المعرفة الفنية لإزالة ملوحة المياه .

ومنذ نشر الطبعة الأولى من هذا الكتاب في ١٩٦٢م ، ظهرت طرق إزالة ملوحة جديدة ، مثل التناضح العكسي الذي تطور بادئاً من وحدة تجريبية إلى محطة صناعية متكاملة . كما نُقِّحت تقنية

إزالة ملوحة المياه ، وبُنى العديد من المحطات الكبيرة . ولقد أُعدت هذه الطبعة الثانية مع الأخذ في الاعتبار هذه التطورات ، وإدخال بعض الإضافات الجديدة وإجراء بعض التغييرات ، ولكن مع المحافظة على الهدف الرئيس من الكتاب ، وهو إعطاء شرح مبسط للأسس الفنية لإزالة ملوحة المياه في كتاب صغير الحجم .

المحتويات

١ مقدمة

■ أين تعتبر تنقية المياه ضرورية ؟ ■ كمية المياه المستخدمة ■ مواصفات درجة الملوحة ■هل يمكن أن تحل المياه الملحة جزئياً محل المياه العذبة ؟ ■ مصادر المعلومات التفصيلية ■ مراجع مختارة .

أين تعتبر تنقية المياه ضرورية ؟

تعتبر مياه المحيطات من أكبر المخازن المائية للكرة الأرضية ، ومع ذلك فإنها تحتوي في المتوسط على حوالي ٣ر٥٪ (بالوزن) من الأملاح المذابة . وكنتيجة لهذا التركيز المرتفع للأملاح ، تصبح المياه غير صالحة لكثير من الاستعمالات المنزلية والصناعية ، بالإضافة إلى عدم صلاحيتها لرى المحاصيل الزراعية التقليدية . وبتعرض المحيطات للشمس تتبخر كمية ضخمة من المياه ، أما الأملاح فإنها لاتتطاير ولا تتبخر . وعندما يصل بخار الماء إلى المناطق المرتفعة الباردة في الجو ، فإنه يتكثف ويُكوِّن السحب التي تترسب على هيئة مياه الأمطار ، والتي تحتوي على نسبة ضئيلة من تركيز الأملاح المذابة . وتسقط بعض الأمطار مباشرة في المحيط حيث لايمكن الاستفادة منها . ويسبب سقوط الأمطار ، في بعض المناطق على الكرة الأرضية ، تكوين الأنهار التي تصب في آخر الأمر في البحار . كما تتخلل كمية أخرى من مياه الأمطار التربة والصخور حيث تسري ببطء شديد خلال الطبقات الأرضية السفلى تجاه المحيط . وفي كلتا الحالتين ، تتفاعل المياه مع الصخور والتربة . وبهذا تُحمل المعادن القابلة للذوبان في الماء إلى المحيط . وبالإضافة إلى هذا ، فإن ماء الأمطار على سطح الأرض يحمل معه المواد العضوية وغير العضوية القابلة للذوبان وغير القابلة للذوبان نتيجة لسريانه فوق الأراضي الآهلة بالسكان والمزروعة والغابات .

من هذا ، فإنه يمكن الاعتقاد بأن نسبة تركيز الملح في المحيط في زيادة مستمرة . ولكن ظهرت كثير من البراهين الجيولوجية التي تثبت عدم تغير نسبة الأملاح في مياه البحار منذ ملايين السنين . ويُعزي هذا إلى حتمية فرض أن الترسيب الذي يتم على الصخور البحرية وعلى شواطىء القارات بالإضافة إلى كمية المعادن المحمولة في الرذاذ من مياه البحر يُعادل كمية المعادن التي تحملها مياه الأمطار إلى البحر . وليس هناك أي دليل على وصول أية كمية محسوسة من المياه إلى المحيط من

داخل الكرة الأرضية أو من الكون . ومن ثم ، فإن الماء المتبخر من البحر يرجع إليه متمثلا في الأمطار أو المياه السطحية ، أو تدفق المياه الجوفية ، وعند هذا الحد تنتهي دورة التقطير العملاقة .

وحيث إن الله عز وجل قد وفَّر هذه الدورة لتنقية المياه ، فإنه يجب تجميع هذه المياه بأية طريقة ممكنة قبل وصولها إلى المحيط بدلا من تشغيل محطات لا هدف لها سوى الحصول على الماء العذب من مياه البحر . وبسبب التوزيع غير المتكافىء للأمطار – نتيجة للموقع الجغرافي أو للتغير في فصول السنة – توجد مناطق يندر فيها المطر وأخرى يتوفر فيها بكثرة .

ونشاهد الآن اتجاهاً كبيراً لإنشاء مجتمعات عمرانية كبيرة في مناطق قاحلة . وقد كان هذا الاتجاه نتيجة للتزايد السكاني في العالم وللاعتقاد باحتمال التحكم في المناخ الداخلي ، بالإضافة إلى عوامل حربية واقتصادية وسياسية مختلفة . ويندر وجود نقص في الماء العذب في بعض المناطق الصناعية الكبيرة في المناطق ذات المناخ المعتدل والمطر الغزير . أما المناطق التي تعاني من ندرة المياه العذبة – بينما تتوفر مياه المحيط أو المياه الجوفية الملحة – فإن تنقية المياه المالحة أو إزالة ملوحة المياه الملحة يصبح أمراً ضرورياً . ولقد أُنشئت المحطات لتنقية المياه منذ عدة سنوات في منطقة الخليج العربي (الكويت والمملكة العربية السعودية) وفي أوروبا (في جزر الهند الغربية) ، وفي أريزونا بأمريكا ، وفي إيلات (جنوب فلسطين المحتلة) ، وفي أماكن أخرى كثيرة . ولقد أصبحت إزالة ملوحة مياه البحر مألوفة على متن الناقلات العابرة للمحيطات منذ أكثر من قرن . كما انتشرت محطات تنقية المياه بكثرة في أجزاء كثيرة من العالم . ولقد بين الرملي وكونجدون* **El-Ramly and Congdon** أنه يوجد في العالم ، حتى أول يناير ١٩٧٥ ، عدد من محطات إزالة ملوحة المياه (تزيد إنتاجيتها على مائة طن لكل منها) يصل إلى ١٠٦٣ محطة من بينها ما ينتج بالفعل وما هو تحت الإنشاء . ولهذه المحطات قدرة إنتاجية تُقدر بحوالي ٢ مليون طن (٥٢٨ مليون جالون أمريكي) من الماء العذب في اليوم . وبالرغم من أن ٨٥٪ من هذه المحطات يستخدم طريقة التقطير ، فإنه يوجد تزايد سريع في الاهتمام بتنقية المياه بالتناضح العكسي (الضغط الأسموزي العكسي) . فمثلا ، عند التخطيط لإنشاء محطة كبيرة لإزالة ملوحة المياه الملحة التي تصب من مصرف مولتون وموهوك إلى أسفل نهر كلورادو (كمية المياه تزيد على ٤٠٠,٠٠٠ طن يوميا) أُخذ في الاعتبار استخدام طريقة التناضح العكسي (لم يشمل حصر ١٩٧٥ هذه المحطة) . ولقد أصبح التناضح العكسي حاليا من الطرق الاقتصادية في إعذاب المياه الملحة .

ولقد أصبحت عملية تنقية مياه البحر – الحصول على المياه العذبة من المياه الملحة – أساسية أكثر من إزالة عُسْر الماء ، والتي تتطلب فقط نزع أملاح الكالسيوم والمغنسيوم . ولقد أُجرى العديد

---

* لمزيد من التفاصيل انظر قائمة المراجع المختارة في نهاية كل فصل .

من الدراسات للطرق المختلفة لإزالة ملوحة المياه . وفي الواقع ، فإن تنقية المياه الملحة لايعد مشكلة من حيث إمكانية التنفيذ ، وإنما المشكلة الأساسية تَكمُن في اقتصادياتها . فمن المعروف أن الحد الأدنى النظري للطاقة اللازمة لإنتاج المياه العذبة من مياه المحيط يُقدر بحوالى كيلو وات واحد لإنتاج ماء عذب قدره طن متري في الساعة ، أي أن الحد الأدنى النظري لإنتاج ١٠٠٠ كيلو جرام من الماء في ٢٤ ساعة يوميا حوالي ٢٤ كيلو وات . أما عملياً ، فإن الطاقة اللازمة تزيد عن هذا الحد الأدنى النظري . وحتى إذا وجدت الطاقة مجانا وبلا مقابل ، فإنه يلزم رأس مال كبير نسبيا لبناء محطات التقطير . وبالطبع عند مايتطلب الأمر إزالة ملوحة كميات صغيرة من المياه ، فإن هذه الاعتبارات السابقة تصبح أقل أهمية من ذي قبل . ولكن إذا كان الغرض هو بناء محطات لإزالة ملوحة المياه لسد احتياجات البلاد الصناعية ، فإن استثمارات رأس المال المطلوب تُصبح مرتفعة جدا بالمقارنة بتكاليف تشغيل إنشاءات مياه البلدية ، والتي تتطلب عمليات سهلة مثل الترشيح عند ضغط منخفض لتنظيف الماء أو إزالة عسره . وبالرغم من أن عمليات معالجة مياه البلدية تتطلب استثمارا كبيرا حيث إن توفير كمية كبيرة من المياه يتطلب وجود مضخات كبيرة ومواسير ومعدات أخرى ، إلا أن عمليات تنقية المياه الملحة تتطلب معدات أكثر تعقيدا ، ومن غير المتوقع أن يتطلب نزع الملح من مياه البحر استثمارا أقل من العمليات البسيطة للترشيح وإزالة عسر الماء . (في الواقع ، فإن الترشيح وإزالة العسر للماء تلزم أحيانا كمعالجة ابتدائية للمياه التي ستنزع ملوحتها) . وتقع أهم عقبة اقتصادية لتنقية المياه الملحة في التناقض بين التكلفة التقليدية المنخفضة للمياه العذبة ، والتكلفة المرتفعة نتيجة تعريض الماء الملح إلى عمليات كيميائية معقدة لاستخلاص الماء العذب منه . وحتى الآن ، لايُمكن صناعياً إنتاج أية مادة — من عمليات كيميائية — يمكن أن تُباع بأقل من ٣٥ سِنْتاً للطن (حوالى ريالا) ، مما يجعل بعض مستهلكي المياه على نطاق واسع في الصناعة والزراعة غير قادرين على دفع هذا المبلغ لشراء الماء تحت الظروف الطبيعية .

ويختلف الموقف كلياً عندما يكون الاحتياج إلى كمية صغيرة نسبيا من المياه تحت ظروف خاصة . ولقد أثبت تقطير مياه البحر في الناقلات عابرة المحيطات جدواه اقتصاديا ، حيث يقل في العادة وزن الوقود ومحطة التبخير عن وزن المياه العذبة التي يجب أن تحملها الناقلة في حالة عدم وجود محطة للتقطير . أيضا ، فإن تكلفة تنقية المياه المطلوبة في الأماكن النائية ، مثل أبراج المراقبة أو آبار البترول في المناطق الصحراوية ، تقل عن تكلفة نقل المياه العذبة إلى هذه المواقع .

ولتقدير مشكلة تنقية المياه الملحة لمجتمع جديد افتراضي ينشأ في منطقة لايتوفر فيها إلا المياه الملحة يلزم مراعاة :

١ — أن يُفحص معدل استخدام المياه العذبة الحالي .

٢ — أن يُعرف الحد الأعلى لتركيز الملح المسموح به لكل من هذه الاستخدامات .

٣ – أن تُبحث إمكانية استخدام المياه الملحة جزئياً بدلا من المياه العذبة .

كمية المياه المستخدمة

لو قسمنا كمية المياه المستخدمة في منطقة معينة على عدد السكان بها فسنحصل على كمية المياه التي يستخدمها الأفراد بطريقة مباشرة أو غير مباشرة . ويمكن تسمية هذه الكمية دليل المياه water index ، ويشمل هذا الدليل جميع المياه المستخدمة ، سواء المنقاة أو غير المنقاة . ويشير الاستخدام المباشر للمياه إلى المياه المسحوبة من الأنهار والبحيرات والروافد والخزانات أو الآبار ، وغالباً يمكن تحديد هذا الاستخدام بسهولة بقراءة عداد مياه منزل أو شقة أي فرد . ويزيد الفرق بين هذه القراءة ودليل المياه كلما ارتفع مستوى البلد صناعياً . فمثلا ، يستخدم رجل البادية بضع عشرات من اللترات فقط من المياه يومياً لنفسه ولقطيعه . وحيث إنه يشتري منتجات وخدمات قليلة من الخارج ، فإن هذه الكمية الصغيرة من المياه لاتختلف كثيراً عن دليل المياه الخاص به . هذا ويختلف الموقف تماما بالنسبة للمجتمعات الصناعية الكبيرة ، حيث تُوضح القيم التقريبية بالجدول (١ – ١) وجهة النظر هذه . وتشمل أرقام الاستهلاك الصناعي كمية كبيرة من مياه التبريد المستخدمة في محطات القوى التي تُدار بالبخار والتي يُمكن استبدالها بالمياه الملحة . (المياه التي تمر خلال توربينات مصانع توليد القدرة الكهربائية بالقوة المائية – والتي تُسترجع جميعها عمليا بدون تغير درجة الملوحة ومع تغير طفيف في درجة الحرارة – لم تؤخذ في الاعتبار في جدول ١ – ١) .

لقد زاد استعمال المياه منذ عام ١٩٦٠ . ويوضح الجدول (١ – ١) الاستهلاك التقريبي للاستعمالات المختلفة وأهميتها النسبية . ولقد استُخدم يوميا مايقرب من ١٤٢٠ مليون متر مكعب* (٣٧٥ بليون جالون أمريكي في اليوم) من الماء في الولايات المتحدة الأمريكية في عام ١٩٧٠ . وتمثل هذه الأرقام دليل مياه حوالي ٦٫٩م^{٣} في اليوم . وكان مايقرب من ثلثي استهلاك هذه المياه من المصادر المائية العذبة و ١٨٪ من مياه الآبار العذبة و ١٤٪ من المصادر المائية الملحة وأقل من ١٠٪ من معالجة مياه المجاري .

وكما نرى ، فإن كمية المياه المستخدمة مباشرة من قبل المواطن في المجتمع الصناعي ، والتي يجب أن يدفع ثمن استهلاكه لها ، تمثل جزءاً بسيطاً فقط من نصيبه في استهلاك الدولة بأكملها . ومعظم المياه التي يستخدمها المواطن بطريق غير مباشر تكون إما من مصادر المياه الأولية ، أو مياهاً أُعيد استعمالها لإنتاج القدرة أو لتصنيع البضائع ، أو مياهاً لري المواد الغذائية وللمحاصيل الصناعية . ودليل المياه الكامل لايمثل فقط كمية المياه المنزلية المستعملة لكل شخص ، بل يعطى

* المتر المكعب (م^{٣}) للمياه النقية يزن طنا مترياً .

الأساس لتقدير احتياجات المياه للمجتمع القائم بذاته تحت الظروف السلمية الطبيعية . ومن الجلي أن يتغير دليل المياه مع المناخ ودرجة ونوعية النشاط الصناعي بكل منطقة .

جدول (١ - ١)
كمية المياه المستعملة في الولايات المتحدة الأمريكية لعام ١٩٦٠م
(متوسط الاستخدام اليومي*)

للصناعات الأساسية	٥٧٠ مليون م^3 في اليوم
للـــرى	٥١٠ مليون م^3 في اليوم
استعمالات أخرى (منزلية وشرب الحيوانات . . . إلخ)	١٠٠ مليون م^3 في اليوم
الكمية الكلية للمياه المستعملة	١١٨٠ مليون م^3 في اليوم
عدد الأشخاص الذين يستعملون هذه الكمية	١٨٠ مليون
دليل المياه =١١٨٠/١٨٠	٦ر٦ م^3 لكل شخص في اليوم
متوسط استعمال المياه في شقق الولايات المتحدة	٢ر٠ م^3 لكل شخص في اليوم
متوسط استعمال المياه في المنازل العائلية بالولايات المتحدة	٥ر٠ م^3 لكل شخص في اليوم
متوسط استعمال المياه في المكاتب الحكومية بالولايات المتحدة	١٢ر٠ م^3 لكل شخص في اليوم
متوسط استعمال المياه في المستشفيات بالولايات المتحدة	١ر٠ م^3 لكل سرير في اليوم

مواصفات درجة الملوحة

(ا) في الاستهلاك البشري

لايمكن لمياه البحر أن تكون بديلًا للمياه العذبة بالنسبة للنظام الغذائي البشري أو للماشية . وتعتمد الدرجة العظمى لتركيز الأملاح المسموح بها في مياه الشرب على نوع الملح والاستهلاك اليومي بالإضافة إلى العوامل الشخصية . ولقد أوصى مركز الولايات المتحدة لخدمة الصحة العامة The United States Public Health Service ألا تزيد درجة الملوحة في مياه الشرب عن ٥٠٠ جزء لكل مليون مع اعتبار أن ١٠٠٠ جزء لكل مليون هو الحد الأعلى للملوحة لمياه الشرب . (تمثل ١٠٠٠ جزء بالمليون مامقداره ١ جرام من الملح لكل كيلو جرام من الماء أو رطلان من الملح لكل طن قصير .) ومع هذا ، فإن هذا الاعتبار لايزيد عن كونه قاعدة تقريبية (لأنه حكم مبنى على التجربة العملية لا على المعرفة العلمية) . وتحتوى بضعة لترات يوميا من المياه المالحة الجوفية على تركيز عالٍ من كبريتات الصوديوم والمغنسيوم التي غالبا ما تُسبب الإسهال . ومن المعروف أيضا أن بعض قبائل إفريقيا الشمالية تحتوي مياه شربها على أكثر من ٢٥٠٠ جزء لكل مليون من الأملاح المذابة ،

* للتحويل للوحدات الأخرى انظر الملحق ٩ أ .

ولم يظهر عليهم أي تأثير مرضي . فإذا كان المُناخ حارا ، وإذا احتوى معظم الملح في هذه المياه على كلوريد الصوديوم ، فإن هذه الملوحة تصبح عندئذ مفيدة لصحة المستهلك ، وذلك بالرغم من أن درجة ملوحة هذه المياه تصل بالتقريب إلى ١ : ١٤ من متوسط درجة ملوحة مياه البحر .

ولما كانت كمية مياه الشرب التي يحتاجها الإنسان صغيرة نسبياً ، إذ تتراوح بين ٢ و ٨ لترات يوميا لكل شخص ، تبعاً للمناخ وطبيعة العمل ، فإن توفير مياه الشرب بتحويل المياه الملحة لايُمثل أية صعوبة اقتصادية على الإطلاق . وفي الواقع ، فإن مقطر انضغاط ، مثل الذي استخدمته البحرية الأمريكية في الحرب العالمية الثانية ، يُمكنه أن يوفر مايقرب من ٧٠٠٠ لتر من الماء المقطر من ماء البحر في اليوم ، باستهلاك مايقرب من ٤٠ لتراً من البنزين . ويحتل الجهاز بملحقاته حيزاً أقل من حجم المياه المنتجة في يوم واحد . ويُعادل سعر هذا المقطر ثمن سيارة متوسطة . وفي حالات الطوارىء القصوى ، مثل المتعلقين بأطواق النجاه بالمحيطات ، تُنتج علبة التقطير بالتبادل الأيوني ستة أمثال وزنها من مياه الشرب بتنقية مياه البحر . هذا ولقد تم تطوير مقطر شمسي نقّال للاستخدام في تنقية المياه الملحة .

(ب) في الصناعة

تختلف مواصفات تنقية المياه المستخدمة في الصناعة اختلافا كبيراً ، وتعتمد هذه المواصفات إجمالًا على الاستعمالات الخاصة لكل صناعة . فمثلا ، يجب أن تكون معظم المياه المستعملة في صناعة النسيج والجلد والورق والكيماويات والأغذية منخفضة الملوحة ، بالإضافة إلى انخفاض عسرها . وعموماً ، تُعد الحماية ضد الصدأ في بيئة المياه الملحة ذات تكاليف باهظة بالنسبة لنظيرتها في الماء العذب ، ولقد تسبب هذا الاعتبار في قلة استخدام مياه البحار في التطبيقات الكثيرة . ويرجع الحد من استخدام المياه الملحة في الصناعة إلى كمية الملح الكبيرة التي تتخلّف عن عملية التبخير . ومن الممكن استخدام المياه العالية الملوحة لتبريد المكثفات الصناعية في معظم الأحيان ، وهناك كمية كبيرة من مياه البحر تستخدم حاليا لهذا الغرض .

(جـ) في الزراعة

بما أن الأمطار – المصدر الطبيعي للري – غالبا ماتخلو من الأملاح ، فليس من العجيب أن تتأقلم معظم النباتات الأرضية على المياه ذات الأملاح القليلة . وبخلاف معظم النباتات المائية بالمحيطات (مثل الطحالب) ، فإن معظم النباتات الأرضية ليس لديها القدرة على المحافظة على عصاراتها والموائع بخلاياها – والتي لها درجة ملوحة منخفضة – إذا ما وُجدت في بيئة ذات درجة ملوحة عالية . وتؤدى زيادة الملوحة في ماء الري إلى نقصان إنتاج المحاصيل الزراعية ، وتختلف هذه

القاعدة إذا كان ماء الري منخفض الملوحة جدا إذ وُجد تحسن مبدئي في الإنتاجية بزيادة درجة الملوحة . ولا تقدر معظم النباتات على النمو إذا ما رويت بمياه البحر .

هذا ولاتعتمد خصائص مياه الري فقط على طبيعة النباتات والأملاح المذابة ، بل تعتمد أيضا على نوع التربة . ويمكن للنباتات المزروعة في التربة الرملية المسامية تحمل درجة الملوحة العالية لمياه الري ، بينما لايمكن لهذه النباتات ، إذا مازرعت في تربة ضيقة المسامية وتصريف ضعيف أن تتحمل مياهاً ذات درجة ملوحة مرتفعة . وتُعتبر طريقة الري أيضا مهمة ، حيث تسمح طريقة ري التقطير drip irrigation بمرور المياه مباشرة إلى التربة عن طريق فتحات تسرب – يمكن التحكم فيها – من مواسير الري . وتسمح هذه الطريقة باستخدام المياه ذات الملوحة العالية أكثر من طريقة الري بالرش العلوي overhead-sprinkler irrigation ، التي تفقد جزءاً كبيراً منها بالتبخير قبل أن تصل مياه الري إلى جذور النباتات . ومما لاشك فيه أن الحد المسموح به لدرجة ملوحة مياه الري لبعض المحاصيل الزراعية ممكن أن يزداد بالبحث الزراعي المنهجي ، الذي يجب أن يأخذ في اعتباره – بالرغم من التناقض الظاهري الواضح – أن إضافة بعض أنواع الأملاح ، مثل كبريتات البوتاسيوم ، لمياه الري يمكن أن تزيد من احتمال النباتات إلى الملح العادي . وعلى أي حال ، فإن معظم المحاصيل الزراعية تقل إنتاجيتها إذا احتوى ماء الري على أكثر من ٢٠٠٠ جزء أملاح في المليون . ويجب تحديد حد السماح لدرجة ملوحة مياه الري على أساس التوافقات المختلفة بين النبات والتربة والمناخ ونوع المياه الملحة إما عن طريق التجارب المعملية أو سجلات مراكز البحوث الزراعية .

وفي الواقع ، لقد أثبت التوافق المضبوط بين أصل النبات ونوع التربة وطريقة الري (ري التقطير ، مع إضافة السماد القابل للذوبان في الماء إلى مياه الري) احتمال نمو الطماطم في الضفة الغربية لوادي أرافا (بين البحرين الميت والأحمر) في شهر يناير باستخدام مياه ري تحتوي على أكثر من ٢٠٠٠ جزء من الأملاح لكل مليون جزء (قبل إضافة السماد) . وبالرغم من هذه الملوحة ، فإنها لاتمثل أكثر من عشر تركيز الأملاح في مياه البحر الاحمر . ولقد أثبتت بعض نباتات الشعير احتمالا لدرجة ملوحة عالية .

وتحتاج المناطق القاحلة إلى كمية هائلة من مياه الري . وانطلاقا من هذا ، فإن ري المناطق القاحلة يعتبر أكبر تطبيق عملي لتنقية مياه البحر . وتبلغ احتياجات مياه الري للأراضي المزروعة حوالي متر مكعب (طن متري) لكل متر مربع في السنة ، وتعادل هذه النسبة ١٫٠٠٠٫٠٠٠ متر مكعب لكل كيلو متر مربع من الأراضي المزروعة . وبالرغم من انخفاض هذا الرقم بزيادة كمية مياه الأمطار المستعملة ، فمن الواضح أن تكلفة إزالة ملوحة المياه يجب أن تكون منخفضة جدا إذا استخدمت هذه المياه في الري . ويجب أن يُفهم جيدا أن وزن المنتجات الزراعية المباعة أقل بكثير من وزن مياه الري المستخدمة في إنتاج هذه المنتجات ، وهي عموماً أقل من ١٪ . وبدلا من مقارنة

تكلفة إزالة ملوحة مياه البحر بتكلفة إحضار المياه من منطقة وافرة المياه ، يجب أن نقارن تكلفة إزالة ملوحة المياه بتكلفة استيراد المنتجات الزراعية ، وبالطبع فإن هذا القرار يعتمد على عوامل أخرى خلاف تكاليف الشحن ، مثل الإنتاج النسبي لكل وحدة مساحة وتكلفة العمالة ، بالإضافة إلى العوامل الدُولية والسياسية الهامة .

هل يمكن أن تحل المياه الملحة جزئيا محل المياه العذبة ؟

لما كانت حضارتنا الصناعية قد تأسست معتمدة على القاعدة المنطقية بأن المياه العذبة سلعة زهيدة الثمن ، فإن المراكز الصناعية الكبيرة تمركزت حول مصادر المياه العذبة الوافرة . وكنتيجة طبيعية لانتشار هذه المراكز الصناعية وتوسعها ، فإن الفرق بين المتوفر من المياه والمطلوب منها بدأ في الانخفاض . وغالبا ماتُقام محطات لتنقية مياه الصرف إلى الأنهار لتوفير المياه النقية للمجتمعات أسفل اتجاه مجرى النهر .

وبزيادة تكلفة المياه في هذه المناطق يجب أن نفكر في التغير الذي سوف يحدث في حياتنا المعتادة وفي صناعتنا في حالة وجوب استخدام بديل جزئي للمياه . وهنا يجب أن نتساءل لو أن بعض المجتمعات القريبة من المحيط لديها نظام ثنائي المياه : أولهما للمياه العذبة وثانيهما لمياه البحر مع استخدام النظام الأخير في أغراض التنظيف ، مثل التنظيف في دورات المياه . (وفي الوقت الحاضر يعتبر النظام ثنائي المياه غير اقتصادي في كثير من الأحوال) . كما سنتساءل أيضا لو أن الصناعة يُمكنها تغيير خطوات إنتاجها جذرياً وتسير بالتصميم الاقتصادي للمياه إلى نفس المدى الذي ذهبت إليه بالنسبة للاستخدام الاقتصادي للوقود . بالتأكيد ، إنه من الممكن أن تستبدل وتختزن نسبة معينة من المياه العذبة . كذلك فإن الناحية النفسية تؤثر في متطلبات المياه العذبة . فمثلا باعتبار استهلاك المياه المنزلية في مدينتين متشابهتين مثل حيفا وتل أبيب في فلسطين المحتلة ، كانت عدادات المياه موجودة في حيفا في الشقق ، بينما في تل أبيب كان يقدر الاستهلاك الشهري للمياه بدلالة حجم الشقق ، ولقد كانت النتيجة أن الاستهلاك المنزلي لكل نسمة في مدينة حيفا أقل من النصف بالنسبة لمثيله في تل أبيب . وبزيادة تكلفة المياه تزيد القابلية لتغيير النظم السائدة للمياه ، ولكن أي تغيير كهذا سيكون بطيئا بسبب الاستثمار الهائل للمجتمع الصناعي في طريقة الحياة المؤسسة على وفرة المياه العذبة . ولكنه لايوجد ، حتى تحت هذه الظروف ، بديل مناسب للمياه العذبة ، إذ إن خطط التنمية لكثير من البلاد القاحلة والمعتدلة ، بالإضافة إلى زيادة العجز المستمر في المياه في المناطق الصناعية ، تتطلب إمدادات إضافية من المياه العذبة . ولقد شهد العقدان السالفان زيادة شديدة في نشاط أبحاث تنقية المياه الملحة وتطورها ، بالإضافة إلى إنشاء الكثير من المحطات .

مصادر المعلومات التفصيلية

كان نتيجة زيادة الاهتمام بتنقية المياه الملحة في عدد كبير من البلاد أن شجعت الأمم المتحدة على تبادل المعلومات الدولية لهذا الموضوع منذ بداية هذين العقدين ، وهي الفترة التي كانت حرجة بالنسبة لتنمية الطرق العلمية والفنية لإزالة ملوحة المياه .

وكما هو معروف ، فإن كثيرا من البلاد شاركت في تنمية علم وتقنية إزالة ملوحة المياه ، ولكن النصيب الأكبر من هذه التنمية تم بدعم من وزارة الداخلية الأمريكية من خلال مكتب المياه الملحة بها Office of Saline Water (O.S.W.) والذي أصبح الآن جزءاً من مكتب أبحاث وتقنية المياه Office of Water Research & Technology . ولقد نُشرت مئات من التقارير التفصيلية الموجودة في التقارير السنوية لمكتب وزارة الداخلية المسؤول عن المياه الملحة والمتميز باستقلاله حتى ١٩٧٤ . وهذه التقارير متوفرة بتكلفة رمزية من قبل المراقب العام للوثائق في مكتب النشر الحكومي الأمريكي بواشنطن دي سي Washington D.C. 20402 وتتوفر في الأسواق نبذات مختصرة للمقالات المختصة بإعذاب المياه (انظر قائمة المراجع المختارة في نهاية هذا الفصل) .

ومن الممكن الحصول على المقالات الأساسية في إزالة الملوحة في مجلات علمية متنوعة ، وعلى وجه الخصوص في مجلة إزالة الملوحة *Desalination,* Elsevier, Amsterdam المتخصصة في هذا الموضوع .

وقبل الدخول إلى التفاصيل ، فربما يرغب القراء المهتمون بهذا الموضوع أن يستشيروا ملخصاً لإحدى المقالات الحديثة المختصة المليئة بالمراجع عن إزالة الملوحة . ولقد نشر ملخص واسع بواسطة أ . أ . دليانس A.A. Delyannis في عام ١٩٧٤ . ويحتوى كتاب مبادىء إزالة الملوحة *Principles of Desalination* والذي نشرته دار أكاديمك برس Academic Press بنيويورك على ملخصات لمقالات مع قوائم مطولة للمراجع التي تغطي جوانب كثيرة للطرق الفنية والعلمية لإزالة ملوحة المياه .

ولقد أضفت في نهاية كل فصل من هذا الكتاب قائمة مراجع إضافية . وبالرغم من أن القائمة غير تفصيلية فإني آمل أن تكون هذه المراجع – التي يمكن توفرها في معظم المكتبات – كافية لإرشاد القارىء إلى الخطوة التالية لدراسته .

مراجع مختارة

General عام

Deming, H.G., *Water- The Fountain of Opportunity,* Oxford University Press. New York, 1975. Original manuscript revised and updated by W. Sherman Gillam and W.H. McCoy.

Reviews مراجعات

Delyannis, A.A., and Delyannis, E.A., *Water Desalting: Gmelin's Handbook of Inorganic Chemistry,* supplementary volume (Anhangband) to *Oxygen,* Springer-Verlag, New York, 1974. A very comprehensive compilation of literature data.

Spiegler, K.S., and Laird, A.D.K., eds., *Principles of Desalination, 2nd* ed., Academic Press, New York, 1977. This monograph contains comprehensive chapters, most with substantial literature reviews (to 1975). On the major desalting methods, on desalting energetics, and on the cost of conventional water supply.

Apelcin, I., and Klyachko, V., *Opresnenie Vodi [Water Desalination],* Moscow. 1968. In Russian, 200 pp., paperback.

Abstracts مستخلصات

Desalination Abstracts, National Center for Scientific and Technological Information, P.O. Box 20125. An extensive international quarterly compilation listing books, journal articles, and patents by subject; started in 1965.

Desalination Abstracts, P.O. Box 1199, Omonia, Athens, Greece. Started in 1969 and appears every second month.

Selected Water Resources Abstracts, Office of Water Research and Technology, U.S. Department of the Interior, for sale by the National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, 5285 Fort Royal Road. Springfield, Va. 22161. Appears semimonthly, covering many aspects of water resources. Index lists articles on "Desalination".

Bulletin de l'association francaise pour l'etude des eaux, Association francaise pour l'etude des eaux, 21 rue de Madrid, 75008 Paris, France. In French; appears monthly and contains selected abstracts on many water-resource topics, including desalination, arranged in order of degree of specialization.

Water Resources Research Catalog, Office of Water Research and Technology, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C., for sale by Superintendent of Documents, Washington, D.C. 20402. Lists ongoing research projects in water technology in general; desalting projects are found in the index under *Chemical Engineering:* "Desalination" and *Waste Control and Water Quality:* "Industrial Wastes".

سجلات المؤتمرات Symposia Proceedings

National Academy of Sciences — National Research Council, *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion 1957,* Publ. 568, Washington, D.C., 1958.

American Chemical Society, *Saline Water Conversion* (Proc. 1960 Symp.), *Advances in Chemistry Series, No.27,* Washington, D.C., 1960.

American Chemical Society, *Saline Water Conversion* (Proc. 1962 Symp.), *Advances in Chemistry Series No. 38,* Washington, D.C.,1963.

Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination, 1965, 3 vols., for sale by Superintendent of Documents, Washington, D.C. 20402.

Proceedings of the Third [Fourth, Fifth] International Symposium on Fresh Water from the Sea (1970, Dubrovnik, 1973, Heidelberg and 1976, Alghero, respectively), 4 vols. each, for sale by A.A. Delyannis and A.E. Delyannis, Tsaldari St. 34, Athens-Amaroussion, Greece.

بيليوجرافيا Bibliography

Ten volumes covering period to 1968. For sale by A.A. Delyannis and A.E. Delyannis (address given above).

تقارير اخبارية Newsletters

Water Desalination Report, for sale by Richard Arlen Smith, Publisher-Editor, P.O. Box 35-K, Tracey's Landing, Md. 20869. Appears weekly.

Water Newsletter, for sale by water Information center, 14 Vanderventer Avenue, Port Washington, N.Y.11050. Covers many fields, including selected news about desalination.

المجلات الجارية المحتوية على أعمال مبتكرة Current Journals Featuring Original Articles

Desalination, Elsevier Scientific Publishing Co., P.O. Box 330, Amsterdam, The

Netherlands. Features primarily articles on the science and technology of salt-water purification.

Journal of the National Water-Supply Improvement Association, Patricia Burke, Managing Editor, c/o AVCO Systems Division, 201 Lowell St., Wilmington, Mass. 01887. Features primarily articles on the management and economics of desalting plants, edited by N.A.El-Ramly.

مسح لمحطات إزالة الملوحة Desalting Plant Inventories

El-Ramly, N.A., and Congdon, C.F., *Desalting Plants Inventory Report* No.5, 1975, Office of Water Research and Technology, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C. 20240.

Second United Nations Desalination Plant Operation Survey, 1973, Resources and Transport Division, Centre for Economic & Social Information, New York or Geneva, Sales No. E.73. II. A.10.

استخدام المياه Water Use

Picton, Walter L., *Water Use in the United States 1900-1980,* U.S. Department of Commerce Report, 1960, for sale by Superintendent of Documents, Washington, D.C. 20402.

Murray, C.R, and Reeves, E.B., *Estimated Use of Water in the United States in 1970,* U.S. Geological Survey Circular 676, Washington, D.C. 20242.

استخدام المياه المالحة في الزراعة Use of Saline Water in Agriculture

Proceedings of the International Symposium on Brackish Water as a Factor in Development, A.S. Issar, ed., Ben-Gurion University of the Negev, Beer Sheva, 1975.

Boyko, H., and Boyko, E., *Proceedings of the International Congress of the Bioclimatology and Biometeorology,* Vol. 3, Part 2, Section B1, Leiden, The Netherlands, March 1959.

Scientific American, Vol. 235 (2), p.44D, August 1976. Brief description of work by E. Epstein and J. Norlyn on irrigation of a special strain of barley with sea water.

Drip/Trickle Irrigation, a journal published every second month by the International Drip-Irrigation Association, 17068 Glentana St., Covina, Calif. 91722.

٢ مكونات المياه الملحة الطبيعية

قبل أن نبدأ في إزالة الأملاح من مياه البحر يجب أن نتعرف أولا على طبيعة وتركيز هذه الأملاح ، فمياه البحر تحتوي على جميع العناصر المعروفة ولكن معظم هذه العناصر موجود بتركيز ضئيل .

لم يُمكن معرفة تركيز المكونات الثانوية لماء البحر بدقة للآن ، إذ إن معظم القيم التي وجدت في الماضي لتركيز هذه المكونات خاطئة . ويلزم تحديد تركيز المكونات الثانوية بدقة نظراً لأهميتها للنباتات والحيوانات البحرية بالمحيطات (مثل الفوسفات والنترات) ، بالإضافة لأهميتها في مجالات خاصة أخرى مثل استخراج الذهب من مياه البحر (كانت هناك محاولات عديدة في هذا الموضوع ولكن الناتج الفعلي كان ضعيفاً جداً ، أما إذا كان الغرض من معرفة مكونات المياه الملحة هو تنقيتها ، فإنه يجب الاهتمام فقط بالمكونات الرئيسة والمعطاة بجدول (٢ — ١) . وبالطبع لايمكن دائما إهمال المكونات الثانوية . فمثلا يحتوى نوع معين من الماء الأخضم **brackish water** على تركيز ضئيل من أيونات الباريوم التي تترسب في وحدات معالجة المياه الملحة بالديلزة الكهربائية **electrodialysis** على هيئة كبريتات الباريوم غير القابلة للذوبان في الماء مما يُحتم معرفة تركيز أيونات الباريوم في هذه المياه .

ويبين جدول (٢ — ١) تركيز الأيونات بدلا من الأملاح التي تتفكك كليا في مياه البحر ، ويمكننا أن نرى أن أيونات الصوديوم والكلوريد توجد بأكبر تركيز ، ولكن هذا لا يجعلنا نعتبر الماء محلولًا نقياً من الصوديوم والكلوريد . وتعتبر كبريتات وبيكربونات الكالسيوم والمغنسيوم أساس أي مشكلة في معظم عمليات تنقية المياه ، إذ تنتج هذه المكونات رواسب غير قابلة للذوبان (مثل كربونات الكالسيوم ، وأكسيد المغنسيوم ، وكبريتات الكالسيوم) تمنع تشغيل العديد. من منشآت إزالة الملوحة بالكفاءة المطلوبة .

جدول (٢ - ١)
المكونات الرئيسة لمياه البحر (جزء في المليون*)

صوديوم (Na^{+})	١٠٥٦١
مغنسيوم (Mg^{2+})	١٢٧٢
كالسيوم (Ca^{2+})	٤٠٠
بوتاسيوم (K^{+})	٣٨٠
كلوريد (Cl^{-})	١٨٩٨٠
كبريتات (SO_4^{2-})	٢٦٤٩
بيكربونات (HCO_3^{-})	١٤٢
بروميد (Br^{-})	٦٥
مواد صلبة أخرى	٣٤
مجموع المواد الصلبة المذابة	٣٤٤٨٣
الوزن النوعي (٢٠°م)	١٫٠٢٤٣
مـــاء	٩٦٥٥١٧

* درجة الكلورية = ١٩٫٠٠٠ ، درجة الملوحة = ٣٤٫٣٢٥

ويعبر عن تركيز الملح في مياه البحر بدلالة الملوحة **salinity** والتي تساوي تقريبا الكمية الكلية للمواد الصلبة الجافة (بالجرام) لكل كيلوجرام من مياه البحر ، أي أجزاء في الألف . وبدلا من الملوحة يمكن استخدام الكلورية **chlorinity** والتي بالتقريب جدا تمثل تركيز أيونات الكلوريد (أيضا كأجزاء في الألف)* . وتتغير الملوحة والكلورية مع كل من العمق والموقع الجغرافي . ففي المحيطات المفتوحة تتراوح الملوحة بين ٣٣٫٦ و ٣٣٫٨ جزءاً في الألف ، ولكنها تحيد بشدة عن هذه القيم في المناطق المعزولة . فمثلا ، في أجزاء شاسعة من بحر البلطيق حيث يزيد معدل الترسيب وتدفق المياه العذبة عن معدل البخر ، تنخفض الملوحة عند السطح إلى أقل من ٧ أجزاء في الألف . ولكن في منطقة أخرى ، مثل البحر الأحمر ، أمكن قياس ملوحة تصل إلى ٤١ جزءاً في الألف . وعليه ، يمكن القول إن أعلى تركيز للملح يوجد في الأماكن التي تحتاج بشدة إلى إعذاب المياه (أو إزالة ملوحتها) .

* التعريفات الدقيقة معطاة في ملحق ٧ أ .

وبالرغم من الفروق الكبيرة في الملوحة من مكان إلى آخر ، إلا أن النصيب النسبي للمكونات الأساسية لماء البحر ثابت تقريبا في جميع الأماكن . فمثلا عند سقوط أمطار غزيرة ، تُخفف الطبقة السطحية لماء البحر مما يجعل تركيز الصوديوم يهبط إلى النصف تقريبا ، ولكن في نفس الوقت يهبط تركيز كل المكونات الأساسية الأخرى إلى النصف أيضا .

وليس بالضرورة أن تكون مياه المحيطات هى المياه الملحة الوحيدة على الأرض . فمن المعروف وجود بعض البحيرات الكبيرة - في المناطق الجافة - بدون تصريف وتحتوي على مياه ملحة نتيجة تبخر الماء المتدفق إلى هذه البحيرات من الأنهار مما يزيد الملوحة بها . ويشمل جدول (٢ - ٢) مثالا لهذه البحيرات .

جدول (٢ - ٢)

تركيز الأملاح في مياه ملحة مختلفة (جزء في المليون)

	البحر الميت (الجزء الشمالي ١٠٠ متر تحت السطح)	بحيرة الملح العظمى (ولاية يوتاه)	البحر الكاريبي
صوديوم	٣٢٠٠٠	٦٧٣٠٠	٣٣٥٠
مغنسيوم	٣٥٧٠٠	٥٦٠٠	٨٠٠
كالسيوم	١٢٧٠٠	٣٠٠	٣٦٠
بوتاسيوم	٦٤٠٠	٣٤٠٠	٧٠
كلوريد	١٧٨٦٠٠	١١٢٩٠٠	٥٥٤٠
كبريتات	٤٠٠	١٣٦٠٠	٣١٧٠
بيكربونات وكربونات	مقدار ضئيل	٢٠٠	٢٣٨٥
بروميد	٥٢٠٠	مقدار ضئيل	

وأخيراً يمكننا أن نضيف أنه يوجد الكثير من المياه الجوفية الملحة في المناطق الشديدة الحرارة . وعموما ، يمكن القول إن الملوحة تزيد بزيادة العمق ولكن مع وجود بعض الاستثناءات . فمثلا ، عند حفر آبار البترول ، فإنه يلزم في العادة اختراق صخور مسامية تحتوى على مياه ملحة بتركيز أعلى من مياه البحر . وتوجد في العادة هذه المياه على عمق كبير من السطح مما يجعلها صعبة

الاستخدام . أما أسباب ملوحة المياه الجوفية في المناطق الشديدة الحرارة فيندر معرفتها بدقة . ومن المؤكد أن تجمع الأملاح المنقولة بالجو بالإضافة إلى معدلات التبخر المرتفعة ووجود تصريف ضعيف ، تسبب جميعها ملوحة مرتفعة في المناطق الشديدة الحرارة بالمقارنة بالمناطق الأخرى . وقد يتسبب تسرب بعض المياه الجوفية الملحة خلال الشقوق في زيادة درجة الملوحة . لذلك ، يجب إعداد دراسة هيدرولوجية دقيقة عن كمية المياه الجوفية ونوعيتها ، الموجودة في طبقات الأرض المختلفة عندما نخطط لمحطة تنقية للمياه الجوفية . ونظراً لعدم وجود معلومات كثيرة عن هذا الموضوع – ولايعرف أحد كيف ستصبح درجة ملوحة مياه أية بئر عندما تسحب منها كمية كبيرة من المياه – لذا من مميزات مياه البحر أنها تعطى غالبا مصدرا مستمرا من المياه دون تغير في نوعيتها .

وتتغير مكونات المياه الجوفية وتركيزات الأملاح بها بشدة مع الموقع . والمكونات الرئيسة متماثلة مع مياه البحر ، ولكنها في العادة تختلف نسبها من مكان إلى آخر . ويحصر جدول (٢ – ٣) مكونات بعض مصادر المياه الجوفية والمياه العذبة . كما يُبين الجدول أيضا مكونات مياه الصرف الملحة من الري (مصرف وِلْتون وموهوك) والتي تتدفق إلى الجزء السفلي لنهر كولورادو بمعدل متوسط قدره ٥ر٠ مليون طن يوميا . ومن المعتاد الحصول على ملوحة عالية لمياه الصرف من المناطق الكثيفة الري ، ولايمكن تلافي هذه الملوحة العالية نظرا للحاجة المستمرة للصرف لإزالة الملوحة الزائدة الناتجة من منطقة الجذور للمحاصيل الزراعية . وتقوم حاليا وزارة الداخلية في الولايات

جدول (٢ – ٣)

مكونات بعض موارد المياه*

	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
بحيرة ايري في بفلو ، نيويورك	٧	٧	٣١	٩	١٣	١١٤
نهر شينادوه في ميلفيل وست فيرجينيا	٧	٨	٣٢	٣	٦	١٣٢
بئر براكيش ، سولت لاك ستي ، يوتاه	٦٨٥	١٣٩	٢٦٦	١٩٤٠	٣٣	٦٧
ينبوع براكيش آسي ، بث شيان ، فلسطين المحتلة	٤٣٤	٧١	١٨٦	٩١٦	١١٣	٣٣٤
مصرف ولتون وموهوك	٧٩٠	٨٠	٣٣٠	١٣٦٠	٧٦٠	٣٦٠

* تمثل جميع الأرقام عدد الأجزاء في المليون . المركبات الثانوية ، مثل النترات والحديد والسليكون ، غير مدرجة بالجدول .

المتحدة بإنشاء محطة لإزالة الملوحة (باستخدام إحدى طرق الأغشية) من الجزء السفلي لنهر كولورادو والذي يسري إلى المكسيك وذلك لخفض سريان مصرف ولتون وموهوك إلى نهر كولورادو . ويُصرف الماء الملح المركز الناتج من هذه العملية في قناة خاصة تُنشأ حاليا لتصب في خليج كاليفورنيا (داخل المكسيك) مما يؤدى إلى ذهاب جزء كبير من الأملاح إلى المحيط .

وعموماً ، تحتوي المياه السطحية على درجة ملوحة منخفضة نسبيا ، وتتكون الأملاح في معظمها من الكالسيوم والمغنسيوم ، وهى الأملاح التي تسبب عسر المياه السطحية . أما مياه البحر فتحتوي على تركيزات عالية من هذه الأملاح مما يجعل هذه المياه عسرة جداً . وبالإضافة إلى ذلك ، تحتوى مياه البحر على كميات كبيرة من كلوريد الصوديوم مما يجعل وزن الصوديوم أكبر من وزن المغنسيوم بمقدار ستة أمثال . وتستخدم إزالة العسر لتحسين نوعية المياه السطحية ، بينما تتطلب مياه البحر عمليات تنقية (أعقد من إزالة العسر) وإزالة كاملة للأملاح قبل الحصول على المياه العذبة .

مراجع مختارة

ملوحة المحيط Ocean Salinity

Sverdrup, H.U., *Oceanography for Meteorologists,* George Allen and Unwin, London, 1945.

Sverdrup, H.U., Johnson, M.W., and Fleming, R.H., *The Oceans,* Printice-Hall, New York, 1942. Baltic Sea, see p. 657.

Riley, J.P., and Skirrow, G., *Chemical Oceanography,* 6 vols., Academic Press. New York (vols.1 and 2 of 2nd ed), 1975.

بحر قزوين Caspian Sea

Chernozubov, V.B., Zaostrovskii, F.P., Shatsillo, V.G., Golub, S.I., Novikov, E.P., and Tkach, V.I., "Prevention of Scale Formation in Distillation Desalination Plants by Means of Seeding", *Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination,* Vol. 2, Washington, D.C., 1965, p. 539, for sale by Superintendent of Documents, Washington, D.C. 20402.

بحر البلطيق Baltic Sea

Ahlñas, K., "Variations in Salinity at Utõ 1911-1961," *Geophysica (Helsinki)* **8** (2): 135 (1962).

البحر الميت Dead Sea

Bentor, Y.K., "Some Geochemical Aspects of the Dead Sea and the Question of its Age," *Geochim. Cosmochim. Acta* **25:** 239 (1961).

مصرف ولتون وموهوك Wellton-Mohawk Drain

Preliminary Sizing Study, Yuma Desalting Plant, Arizona, Table 13, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colo., p. 15a.

٣ احتياجات القدرة

■ الحد الادنى المطلق للقدرة ■ عمليات غير مثالية ■ مراجع مختارة

الحد الأدنى المطلق للقدرة

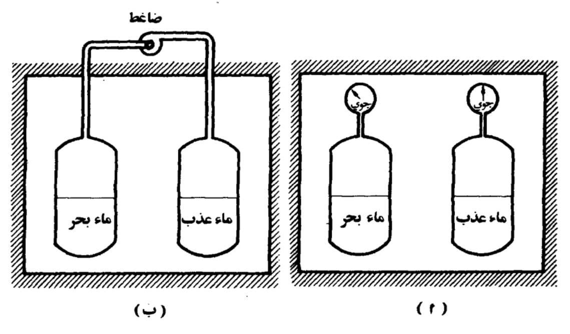
من الطبيعي أن نسأل – إذ إن هذا متصل بالموضوع – عن أنواع وكميات الطاقة الضرورية لعملية تنقية المياه الملحة ومن أي مصدر ستأتي هذه الطاقة . ونظرا للحاجة لتنقية كميات هائلة من المياه ، فإن الاستهلاك الصغير نسبيا في القدرة لكل طن من الإنتاج اليومي يصبح كمية جديرة بالاهتمام في المحطات الكبيرة . وتستخدم القدرة مثلا في ضخ المياه الملحة خلال أبسط محطات التنقية . ولكن هناك دائما فقداً في الحرارة وفي التبريد وتسرباً في الهواء عندما تتطلب عملية التنقية تسخيناً أو تبريداً أو تفريغاً جزئياً للهواء . لذا ، فهناك حاجة دائمة إلى كمية معينة من الطاقة لتشغيل عملية تنقية المياه الملحة . وبغض النظر عن الفقد في الطاقة السابق ذكره ، فإن تنقية مياه البحر تتطلب حداً أدنى جوهريا من الطاقة المتاحة .

وغالبا ماتسمى الطاقة المتاحة بالطاقة المستفادة **exergy or utilizable energy** ، وهي طاقة ميكانيكية أو كهربائية أو أية طاقة أخرى يمكن عمليا تحويلها كلياً إلى جهد ميكانيكي . فمثلا ، في محطات القوى الحرارية ، فإنه يمكن تحويل أقل من نصف الطاقة في بخار الماء الساخن إلى جهد بتشغيل توربينات بخارية ، بينما يذهب أكثر من نصف طاقة البخار الى المكثفات التي تعتبر مكونات أساسية للمحطة . ومن هنا ، فإن الحرارة (التي تسمى عادة الطاقة الحرارية) لايمكن تحويلها كلياً إلى شغل ، وعليه يمثل جزء فقط من السعرات الحرارية في بخار الماء الساخن الطاقة المتاحة **available energy** . وهناك كميات وافرة من المياه والهواء تحتوى على طاقة حرارية كثيرة ولكن لايمكن تحويل هذه الطاقة إلى جهد إلا إذا توفر وسط تبريد للاستخدام في المكثفات أو الأجهزة المماثلة . لذا لايمكن للطاقة بمفردها أن تزيل ملوحة المياه ، ومن الضروري وجود شغل ميكانيكي أو أي شكل من

أشكال الطاقة يمكن تحويله إلى شغل ميكانيكي مثل الطاقة الكهربائية . باختصار فإنه من الأصلح القول إنه يوجد شغل أدنى أو متطلبات من الطاقة المتاحة (بدلا من الحد الأدنى لمتطلبات الطاقة) لإزالة ملوحة طن واحد من مياه البحر . ويمكن التعبير أيضا عن هذه الفكرة بالقول بوجود حد أدنى لاحتياج القدرة (الطاقة المتاحة لكل ساعة) لكل طن من المياه العذبة المنتجة في الساعة .

ويمكن حساب الحد الأدنى لكمية الجهد من عملية إزالة الملوحة الافتراضية الموضحة في شكل (٣ – ١) . ويتكون الجهاز من قارورتين كبيرتين موضوعتين في وعاء تحتوي إحداهما على ماء بحر والأخرى على ماء عذب . ويتصل الوعاء اتصالا جيدا بخزان كبير للمحافظة على درجة حرارة ثابتة . ويتم تفريغ الهواء من القارورتين عند بدء عملية إزالة الملوحة . أما الهدف من هذه التجربة فهو نقل ماء بدون ملح – من قارورة ماء البحر إلى قارورة الماء العذب والمحافظة على درجة حرارة ثابتة .

نعتبر أولا الحالة الموضحة في شكل (٣ – ١ أ) والتي تكون فيها القارورتان غير متصلتين . ففي كلتاهما يتبخر الماء إلى الفراغ الموجود فوقهما حتى يصل ضغط بخار الماء الى قيمة معلومة ، ثم يثبت عندما يصبح عدد جزيئات الماء المتبخر من السطح يعادل دائما عدد جزيئات الماء الراجع من البخار ، ويسمى هذا الضغط بضغط البخار المتعادل . ويزيد هذا الضغط بزيادة درجة الحرارة .



شكل (٣ – ١)

احتياجات القدرة لتنقية ماء البحر . توضح أجهزة قياس الضغط في (أ) فرقا في الضغط بين ماء البحر والماء العذب . ويلزم استخدام ضاغط لنقل بخار الماء النقي من الوعاء الأيسر إلى الوعاء الأيمن (شكل ب) . وتتصل الوحدة كلها بخزان كبير له درجة حرارة منتظمة لحفظ درجات الحرارة في جميع أجزاء الوحدة عند درجة حرارة ثابتة .

ويقل ضغط البخار المتعادل لماء البحر عند أي درجة حرارة عن مثيله للماء النقي نتيجة لوجود عدد أقل من جزيئات الماء عند سطح ماء البحر بالإضافة إلى انخفاض معدل التبخر . وبناء على ذلك ، فإنه عند حالة الاستقرار يقل أيضا عدد الجزيئات الراجعة إلى السائل نتيجة لانخفاض الضغط . ولايعد هذا الفرق كبيرا جداً . وكما هو موضح في جدول (٢ - ١) فإن ضغط البخار المتعادل لماء البحر يقل فقط بحوالي ١ر٨٤٪ عن قيمته للماء النقي ، وبسبب هذا الفرق في ضغطي البخار ، فإنه لايمكن نقل بخار الماء باستمرار من قارورة ماء البحر إلى قارورة الماء العذب عند وصل أعلى هاتين القارورتين . وعند وصل القارورتين فإن الماء ينتقل في الاتجاه العكسي - أي يتقطر الماء العذب في خزان الماء الملح . وعليه ، فإنه من الضروري وجود مضخة أو ضاغط بين القارورتين لرفع ضغط بخار الماء المسحوب من قارورة ماء البحر إلى قيمة أعلى قليلا من الضغط الموجود في قارورة الماء العذب . وهكذا يُدفع بخار الماء الى قارورة الماء العذب ويتكثف هناك ، مع فرض أن أية حرارة تتكون بهذه المضخة تتسرب في الحال الى المحيط الخارجي حتى لاتتغير درجة حرارة البخار .

ويعادل الجهد المبذول بالمضخة الافتراضية فرق الضغط مضروباً في حجم بخار الماء . وحيث إن ضغط البخار المتعادل للمياه العذبة عند درجة ٢٥ مئوية هو ٠٣١٢ر٠ ضغط جوي ، وحجم جرام واحد من بخار الماء عند هذا الضغط هو ٤ر٤٣ لتراً ، فإن الشغل الذي يقوم به الضاغط يصبح ٠٣١٢ر٠ × ٠١٨٤ر٠ × ٤ر٤٣ = ٠٢٤٩ر٠ لتر ضغط جوي لكل جرام من الماء ، أو ٩٠٠ر٢٤ لتراً ضغط جوي لكل متر مكعب = ٧٠٣ر٠ كيلو وات ساعة لكل متر مكعب . ويصبح الحد الأدنى النظري لجهد إزالة ملوحة مياه البحر (بدرجة ملوحة ٣ر٣٤٪ عند درجة ٢٥ مئوية) = ٧٠ر٠ كيلو وات - ساعة لكل متر مكعب = ٦٥ر٢ كيلو وات - ساعة لكل ١٠٠٠ جالون أمريكي .

ويزيد استهلاك الحد الأدنى للجهد مع زيادة درجة الحرارة . وبطريقة حسابية مشابهة ، وُجد أنه عند درجة ٧٠ مئوية يلزم نظريا ٨١ر٠ كيلو وات - ساعة ، وعند درجة صفر مئوية يلزم نظريا ٦٥ر٠ كيلو وات - ساعة فقط لإزالة ملوحة مامقداره ١ متر مكعب من المياه .

أما الاستهلاك الحقيقي في الطاقة للضاغط ، فإنه يزيد نسبياً عن ٧٠ر٠ كيلو وات - ساعة لكل طن ماء مقطر . ويعزي هذا الاختلاف في استهلاك الطاقة إلى حيود أداء الضاغط عن الأداء المثالي ، أي أن الضاغط لايستطيع تحويل كل الطاقة المحركة إلى جهد ضغط . وربما نتساءل عما إذا كانت هناك عمليات أخرى لم يتم اختراعها بعد وتتطلب جهداً أقل من الحد الأدنى المطلق للجهد . ولقد أجاب العلم على هذا السؤال بالنفي القطعي ، حيث نُفِّذت العملية الموضحة سابقاً بأسلوب انعكاسي ، أي باستخدام الحد الأدنى المطلق للجهد للقيام بالعملية في الاتجاه المطلوب . فإذا انخفض ضغط بخار الماء قليلًا ، فإن البخار سوف يسري في الاتجاه العكسي ، أي من قارورة الماء العذب إلى

قارورة ماء البحر . ولقد نص القانون الثاني للديناميكية الحرارية – وهو أحد قواعد العلم الحديث – على أنه إذا حدثت تغيرات بأسلوب انعكاسي فقيمة الجهد المستخدم لاتعتمد على الطريقة المستخدمة . وهذا يعني أنه لايهم على الإطلاق الطريقه المستخدمة لنقل الماء من قارورة ماء البحر إلى قارورة الماء العذب طالما أن الطريقة تتم بأسلوب انعكاسي ، أما إذا تمت عملية نقل الماء بأسلوب غير انعكاسي ، مثل استخدام ضاغط لرفع ضغط البخار بمقدار ٥٪ أو ١٠٪ بدلا من النسبة المئوية المطلوبة وهى ٨٤ر١٪ ، فإن استهلاك القدرة سيزيد حتماً عن الحد الأدنى للقدرة . ولهذا تصلح قيمة استهلاك القدرة (أي الحد الأدنى المطلق) لأية عملية انعكاسية وليس فقط للعملية التي شُرحت سابقاً .

ومن أهم عيوب العمليات الانعكاسية أنها بطيئة للغاية . وعملياً يجب التضحية ببعض الزيادة في تكلفة الطاقة المستخدمة لضمان أداء عملية إزالة الملوحة بمعدل معقول . وبالطبع ، فإن تبخير الماء من قارورة ماء البحر يعمل على تبريد ماء البحر بينما يؤدي تكثيف الماء في قارورة الماء العذب إلى تسخين الماء العذب . ونظراً لأن كلتا القارورتين متصلتان بخزان له درجة حرارة ثابتة ، فإن هذا لايؤثر على عملية إزالة الملوحة لأن درجة الحرارة تُحفظ ثابتةً ، كما أن الحرارة الناتجة من تكثيف البخار في القارورة اليمنى تُعوِّض بالتقريب الحرارة الضرورية لتبخير الماء في القارورة اليسرى .

وكلما زاد معدل التقطير بالجهاز الموضح في شكل (٣ – ١) كلما زاد تركيز الملح في ماء البحر مما يسبب انخفاضاً أكبر في ضغط البخار المتعادل . وكنتيجة لهذا أصبح لزاماً على الضاغط أن يتغلب على فرق الضغط المتزايد بين القارورتين ، ويحتاج هذا إلى جهد أكبر لإنتاج كل متر مكعب من الماء . ويرجع الحد الأدنى لاستهلاك الجهد الذي قدم فيما سبق إلى بداية العملية ، أي عندما تُستخلص كمية صغيرة فقط من الماء العذب من كل دفعة من دفعات مياه البحر ، وهذه الأخيرة تطرد بالتالي . وفي الواقع ، فإن العملية تستمر لفترة أطول لتجنب ضخ كمية كبيرة من مياه البحر . ولاستخلاص ٣٠ و ٥٠ و ٦٧ و ٧٥٪ من المياه فإن متطلبات الحد الأدنى للجهد تكون على التوالي هى ٨٤ر٠ و ٩٧ر٠ و ١٦ر١ و ٣٠ر١ كيلو وات – ساعة لكل متر مكعب كما هو مشروح وموضح في ملحق (١ أ) . وتقل متطلبات الجهد للمياه بانخفاض الملوحة بالمقارنة بملوحة مياه البحر ، ويمكن حساب القيم المطلوبة للجهد الأدنى باستخدام القوانين الموجودة في ملحق (١ أ) .

وتقوم كل عمليات تنقية المياه المالحة بفصل الماء الخام إلى (١) كمية ذات تركيز عال (٢) كمية ذات تركيز ضعيف أو مياه نقية تماما . ولهذا ، فإنه ليس من الغريب ضرورة استثمار الجهد في هذه العمليات . وتميل الطبيعة دائما إلى إزالة الفروق . فإذا وُضع محلول ملح وماء عذب معاً في وعاء ، فإنه سيحدث خلط للمحلولين معاً ليصبح التركيز في المحلول الناتج منتظما . ولم يستطع أحد أبدا ملاحظة انفصال المحلول تلقائياً إلى كمية ذات تركيز مرتفع وأخرى ذات تركيز مخفف . ومن

هذا المنطلق ، تتشابه هذه المشكلة بتلك الموجودة في التبريد . فإن أي مبرد منزلي يبرد الحيز الداخلي وفي نفس الوقت يسخن الحيز الخارجي . وتتطلب هذه العملية أيضا استخدام الجهد (بوساطة ضاغط) أو (كما في بعض المبردات التي لاتستعمل ضاغطاً) بسريان الحرارة من درجة حرارة مرتفعة إلى أخرى منخفضة وهى عملية يمكن من خلالها توليد جهد .

عمليات غير مثالية

ترجع متطلبات الحد الأدنى للقدرة إلى عمليات مثالية مع عدم وجود أي فقد للقدرة على الإطلاق . وفي الواقع ، فإنه من المستحيل أن نصل إلى هذا الهدف ، فكل العمليات العملية تتضمن احتكاكاً وأداءً غير كامل للمعدات الميكانيكية والكهربائية ، وضخاً للماء الناتج وللماء الملح المركز واستهلاكات أخرى للقدرة لم تُؤخذ في الاعتبار في الحسابات التي قدمت سابقاً .

وعموما ، فإن العملية تقترب من متطلبات الحد الأدنى للطاقة نظريا فقط عندما تُنفَّذ ببطء شديد ، وهذا يتطلب محطات ضخمة ومفاهيم تصميم جديدة تماماً للمعدات لتعمل بكفاءة عالية عند مثل هذا المعدل المنخفض . ولربما يبدو غير عملي التخطيط لاستخدام القدرة لتصبح قريبة من الحد الأدنى النظري . وعندما تكون الطاقة المستخدمة في صورة حرارة ، فيجب ملاحظة أن جزءاً من الحرارة فقط يمكن تحويله إلى جهد ، وتعتمد قيمة هذا الجزء على العملية المستخدمة . فمثلا ، يتم تحويل الحرارة إلى قدرة كهربائية في المحطات الحديثة بكفاءة تتراوح من ٣٠ - ٤٠٪ .

وبالرغم من هذه الاعتبارات ، فإن أرقام استهلاك الحد الأدنى للجهد تكون ذات قيمة للباحثين في موضوع تنقية المياه الملحة . فهذه الأرقام تشير إلى الحد الأدنى الطبيعي لتنقية المياه . وهذه الأرقام لاتعتمد على درجة الكمال للآلات المتوفرة والتي غالبا ما تتأثر بعامل الزمن .

ولتوضيح معاني الظروف غير المثالية ، دعنا ندرس العملية التي تضيع فيها الطاقة لصرف الماء الملح والماء المقطر عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة مياه البحر القادمة للعملية . فإذا زادت درجة الحرارة بمقدار صغير مثل ثلاث درجات مئوية فسيكون ضياع الحرارة حوالي ٣٠٠٠ سعر حراري لكل متر مكعب لمقدار الماء الملح والمقطر معاً . فإذا تم تحويل نصف مياه البحر إلى مياه عذبة ، فإن الطاقة الضائعة تقدر بحوالى ٦٠٠٠ سعر حراري لكل متر مكعب من الماء المقطر الناتج . ويُقارن هذا مع متطلبات الحد الأدنى النظري من الحرارة للعملية . فعند درجة ٢٥ مئوية يصبح الجهد الأدنى المطلوب حوالى ٠ر٩٧ كيلو وات - ساعة لكل متر مكعب (انظر ملحق ١ أ) ، أي مايعادل حراريا حوالي ٨٣٥ سعراً حرارياً لكل متر مكعب . من هنا ، فإن الفقد في الحرارة من خلال درجة حرارة صغيرة يقدر بحوالي سبعة أمثال الطاقة المتاحة الضرورية لمحطة مثالية عكسية لتنقية المياه . وعليه ، فإن العمليات التي تستهلك حوالي عدة مرات مثل الحد الأدنى للطاقة

المتاحة هى أفضل مايمكن توقعه . وبالطبع ، فإنه ليس من العدل أن نقارن الجهد بالحرارة مباشرة لأن الحرارة لايمكن تحويلها تماما إلى جهد (ملحق ٢ أ) . وحتى باعتبار كفاءة تحويل الحرارة إلى جهد بحوالي ٤٠٪ فإن فقد الطاقة يظل حوالي ثلاث مرات أعلى من متطلبات الجهد النظري .

ولاتضيف متطلبات القدرة للضخ كثيرا إلى تكلفة الطاقة ، ولكن مع هذا لايمكن إهمالها . ودعنا الآن نقارن الحد الأدنى للجهد النظري ، وقدره ٩٧ر٠ كيلو وات – ساعة لكل متر مكعب من الماء الناتج ، مع تكاليف الضخ . فبما أن ٩٧ر٠ كيلو وات – ساعة تعادل ٣٥٦ طن – متر ، فإن الحد الأدنى للجهد يعادل الشغل اللازم لرفع طن من مياه البحر مسافة ٣٥٦ متراً* . وبفرض أن مضخات المحطة يجب أن ترفع الماء إلى ارتفاع قدره ٤٠ متراً ، وإذا كانت كفاءة المضخة حوالي ٦٧٪ ، فإن جهد الضخ سيضيف ٦٠ طن – متر أخرى لكل طن من مياه البحر المزالة ملوحتها . ولو أُنتج طن واحد من المياه العذبة من كل طنين من مياه البحر ، فإن جهد الضخ يصبح حوالى ١٢٠ طن – متر لكل طن من الماء العذب الناتج ، أي أن جهد الضخ يُقدر بحوالي ثلث الحد الأدنى للجهد النظري لإزالة ملوحة المياه باسترجاعية قدرها ٥٠٪ .

* الطن المستخدم هو الطن المتري دائماً مالم يذكر خلاف ذلك .

مراجع مختارة

الطاقات المتنوعة والطاقة المتاحة

General Energetics, "Useful" Energy (Availability, Exergy)

Hatsopoulos, G.N., and Keenan, J.H., *Principles of General Thermodynamics,* Wiley, New York, 1965. In English.

Chartier, P., Gross, M., and Spiegler, K.S., *Applications de la thermodynamique du non-equilibre: Bases d'energetique pratique,* Hermann, Paris, 1975. In French.

Baehr, H.D., *Thermodynamik, 2nd* ed., Springer-Verlag, Berlin, 1966. In German.

طاقات إزالة ملوحة المياه **Energetics of Water Desalting**

Tribus, M., "Thermo-economic Considerations in the Preparation of Fresh Water from Sea Water, *Dechema Monogr.* **47**:43 (1962).

Bromley, L.A., Singh, D., Ray, P., Sirdhar, S. and Read, S.M., "Thermodynamic Properties of Sea-Salt Solutions," *Am. Inst. Chem. Eng. J.* **20**:326 (1974).

Gilliland, E.R., "Fresh Water for the Future," *Ind. Eng. Chem.* **47**:2410 (1955).

٤ القشور

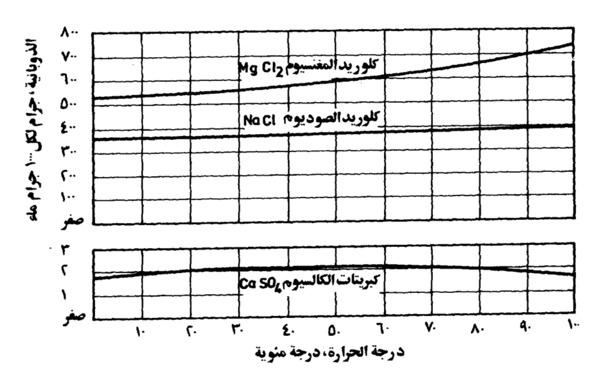
■ حد الذوبانية ■ كبريتات الكالسيوم ■ هيدروكسيد المغنسيوم ■ كربونات الكالسيوم ■ منع التقشر ■ مراجع مختارة

القشور هى رواسب معدنية تتكون على الأسطح الصلبة في المعدات الصناعية ، وتعتبر القشور ذات أهمية خاصة في تنقية المياه الملحة حيث تظهر في معظم العمليات المستخدمة حالياً في الصناعة . ففي عمليات التقطير يمكن أن تتكون القشور على أسطح أنبوب المُبَخِّر ، أما في طرق الأغشية فتتكون القشور على أسطح الأغشية التي تعمل كمناخل أيونية . ويؤدي وجود القشور إلى صعوبات في التشغيل ونقص في الكفاءة . ففي التقطير ، مثلا ، تقلل القشور معدل انتقال الحرارة خلال الأسطح الموجودة عليها . أما في الديلزة الكهربائية والتناضح العكسي ، فإنها – أي القشور – تسد الأغشية وتزيد المقاومة الكهربائية أو الهيدرولية ، واستهلاك الطاقة . ولهذا يعتبر منع ترسب القشور جزءاً متكاملا مع تصميم وتشغيل وتكاليف هذه العمليات . وغالبا ماتثبت ضرورة المعالجة المسبقة للمياه الملحة قبل عملية إزالة الاملاح ، حيث تساعد المعالجة المسبقة على إزالة أو التقليل من تركيز الأيونات التي يمكن أن تدخل في مكونات القشرة .

وتستخلِص القشور مكوناتها من المياه الخام ، مالم يكن هناك تآكل مصاحب لترسيب القشور ، وفي هذه الحالة ، تصبح نواتج التآكل (مثل أكسيد الحديد) جزءاً من القشور المترسبة . ويعتمد تركيب القشور على مكونات المياه الخام وظروف التشغيل . ولقد كشفت الاختبارات الكيمائية والمعدنية للقشور المترسبة في محطات معالجة المياه وفي الغلايات عن عدد كبير من المركبات في القشور المختلفة . وعادة ماتحتوى القشور في محطات تنقية المياه على المركبات الكيميائية التالية : أكسيد المغنسيوم وكربونات الكالسيوم وكبريتات الكالسيوم . ولقد وجدت هذه المركبات في أشكال صلبة مختلفة إما خالصة أو على هيئة خليط . وتتكون القشور عندما تتعدى ذوبانية هذه المركبات حد السماح . وتتسبب أملاح الكالسيوم والمغنسيوم في عسر الماء .

حد الذوبانية

تختلف ذوبانية الأملاح في مياه البحر والمياه المالحة اختلافا كبيراً . ويُبيِّن شكل (٤ — ١) ذوبانية ثلاثة من الأملاح الموجودة بكثرة في هذه المياه كدالة رياضية لدرجة الحرارة . ولقد تم الحصول على هذه البيانات بإذابة ألف جرام من المياه العذبة مع كميات من هذه الأملاح لتحديد أكبر كمية من الأملاح يمكنها الذوبان في المياه عند درجات حرارة معينة .



شكل (٤ — ١)

ذوبانية كلوريد المغنسيوم وكلوريد الصوديوم وكبريتات الكالسيوم في الماء .

ومن الواضح أن كلوريد المغنسيوم وكلوريد الصوديوم (الملح المألوف) يذوبان بدرجة عالية في الماء . ويمكن تركيز مياه البحر الطبيعية إلى حوالي عُشُر حجمها قبل أن يصل تركيز كلوريد الصوديوم إلى درجة التشبع . ولايتم تركيز المياه الخام عادة إلى هذه الدرجة مالم يكن هناك رغبة في استخلاص الملح أو كلوريد المغنسيوم . ولهذا ، فإن الأملاح ذات الذوبانية العالية لاتدخل عادة ضمن مكونات القشور التي تتكون في محطات تنقية المياه . وتزيد ذوبانية كل من كلوريد المغنسيوم والملح العادي مع زيادة درجة الحرارة . ويطلق على هذا الذوبان ، الذوبان الطبيعي على الرغم أن حدوث العكس معتاد نسبياً . وعليه ، فإن ذوبانية كبريتات الكالسيوم المبينة أيضاً في شكل

(٤ – ١) تقل بزيادة درجة الحرارة بعد ٣٨ درجة مئوية (ذوبانية مقلوبة لهذا المدى من درجة الحرارة) وتزيد ذوبانية كلوريد الصوديوم بنسبة قليلة (كنسبة مئوية) مع زيادة درجة الحرارة .

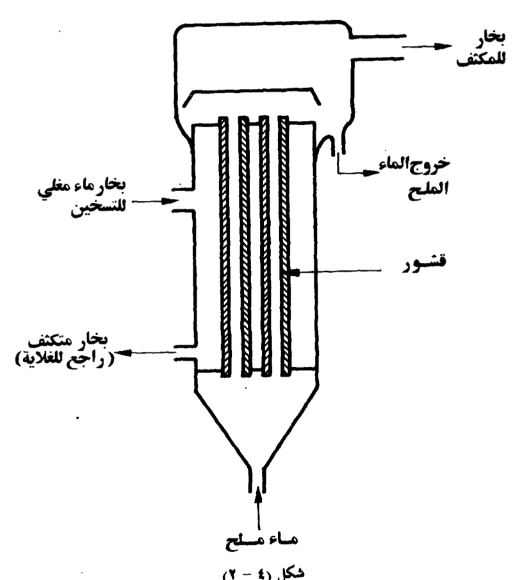
ويُشير كلّ من منحنيات الذوبانية في شكل (٤ – ١) إلى محلول من نوع واحد من الملح في الماء مع أن معظم المياه الطبيعية تحتوي على أنواع كثيرة من الأملاح المختلفة . ويُؤثر وجود بعض الأملاح الأخرى غالباً على ذوبانية كل ملح . فمثلا ، تزداد ذوبانية كبريتات الكالسيوم وكربونات الكالسيوم وتقل ذوبانية كلوريد المغنسيوم في محلول مركز من كلوريد الصوديوم بالمقارنة بالذوبانية في المياه العذبة . ويُزيد وجود كلوريد المغنسيوم ذوبانية كبريتات الكالسيوم بدرجة كبيرة . لذا ، يلزم عند تعيين حد الذوبانية أن يؤخذ في الحسبان وجود الأملاح المذابة الأخرى . وعندما تُفصل المياه العذبة من المياه الملحة فإنه من الطبيعي أن يزيد تركيز الأملاح مما يجعل واحداً أو أكثر من الأملاح يصل إلى حد التشبع . على ذلك ، فإن تسخين المياه المُشْبعة بملح ذي منحنى ذوبانية مقلوب ، مثل كبريتات الكالسيوم ، يجعل التركيز يتعدى حد السماح للذوبانية حتى بدون غلي الماء – لأن ذوبانية مثل هذه الأملاح عند درجات الحرارة العالية أقل منها عند درجة حرارة الجو . وفي كلتا الحالتين ، فإنه يتم الحصول على محاليل فوق مشبعة ، أي محاليل تحتوى على أملاح بكميات أكثر من حد الذوبانية . وبالرغم من عدم استقرار المحاليل فوق المشبعة ، فإنه ليس من الضروري أن تترسب الأملاح الصلبة في الحال من هذه المحاليل . ولكن ، عندما تلامس هذه المحاليل بلُورة من مادة صلبة معينة ، فإن كل المواد الصلبة المذابة فوق حد التشبع تترسب في الحال . وقد وجد أن كلًا من بلّورات الملح في المحلول فوق المشبع وبلورات العديد من المواد الصلبة يمكن أن تكون مركزاً للتبلور .

ولقد فُسِّر تَكوُّن القشور (منذ سنوات) في عمليات التقطير على أساس منحنى الذوبانية المقلوب لكثير من المعادن الداخلة في تكوين القشور . ولقد وُضِّحت الأسباب على أساس أن ذوبانية مكونات القشور عند سطح أنابيب التسخين تقل عنها في معظم المحلول ، مما يُعجِّل بالوصول إلى حالة فوق التشبع عند السطح ، وبالتالي يحدث الترسيب في الحال على السطح الصلب . ومن المعروف الآن أن التشبع فوق العادي هو واحد فقط من مستلزمات ترسيب القشور . وتوجد مراكز التبلور مالم يكن المحلول في حالة فوق التشبع بدرجة كبيرة ، فاذا وُجدت مراكز التبلور هذه على سطح التسخين ، فإن القشور سوف تترسب على هذا السطح . أما إذا وُجدت مراكز التبلور في منطقة أخرى ، فإن ترسيب المواد الصلبة من المحلول فوق المشبع سوف يحدث في تلك المنطقة .

وللتخلص من مشكلة القشور لنوع معين من الماء الخام ، فإنه يجب أن نسأل أولا تحت أي ظروف لدرجة الحرارة والتركيز تصبح المياه الخام غير مستقرة ، أي تصبح الظروف مواتية ومشجعة لتكوين القشور . وفي المعتاد يمكن منع تكون القشور بالآتي (١) تصميم العملية بحيث لايمكن أن

تتوفر الظروف التي تساعد على تكوين القشور في أي مكان في وحدة إزالة الملوحة أو (٢) بالتحكم في درجة فوق التشبع مع مراعاة أن يتم ترسيب المواد الصلبة فقط بعد أن تترك المياه الجهاز .

ولحل مشاكل القشور ، يجب أن تؤخذ كل مشكلة بمفردها ، أي كعلاقة القشور بالآتي : (١) مكونات المياه الخام و (٢) عملية إزالة الملوحة المقترحة . ولقد حدد و . ف . لنجلير ومعاونوه Langelier and coworkers بجامعة كاليفورنيا في بركلي ، البيانات الأساسية لحدود السماح للمحاليل التي تحتوي على أملاح لتكوين القشور ، وسنناقش هذه الأعمال بإيجاز في فقرات قادمة .



شكل (٤ - ٢)

تكون القشور في مقطر . يسخن بخار الماء المغلي الماء الملح الساري إلى أعلى الأنابيب فيغلي الماء الملح ويتصاعد البخار متجها الى المكثف . وتتكون القشور على الأسطح الداخلية للأنابيب مما يقلل قطر الأنابيب وبالتالي تقل الحرارة المنقولة خلال جدران الأنابيب . ويمكن أيضا عكس اتجاه سريان الماء الملح .

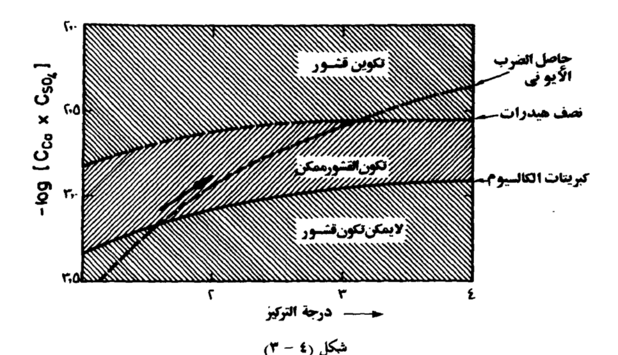
وبالرغم من اهتمام هذه الأبحاث أساساً بتكوين القشور في محطات التقطير ، إلا أن هذه الأبحاث تحتوي على كثير من النتائج التي يمكن تعميمها على طرق المعالجة الأخرى .

ويبين شكل (٤ – ٢) التمثيل التخطيطي لتكوُّن القشور في وحدة تقطير . ويسري الماء الخام خلال أنابيب تُسخَّن ببخار الماء المغلي . ويُمكن أن تتكون القشور حينئذ داخل الأنابيب . أما إذا كان التسخين بلهب مباشر ، فإن احتمال تكون القشور يزيد نتيجة ارتفاع درجة حرارة الأنابيب ، وبالتالي تزيد درجة فوق التشبع للأملاح ذات منحنيات الذوبانية المقلوبة ، مما يُعجِّل بترسيب هذه الأملاح على سطح الأنابيب الساخنة . وعلاوة على ذلك ، فإن درجات الحرارة العالية تجعل القشرة صلبةً جداً ومن الصعب إزالتها . وهذا لايحدث في غلاية توليد البخار حيث يستخدم ماء غير عسر لايحتوي على الأملاح التي تُكوِّن القشور . ويعود البخار المتكثف إلى الغلاية حيث يستخدم مرة ثانية لتوليد البخار لتجنب دخول أية مواد مكونة للقشور إلى الغلاية . أما الكمية الصغيرة من المياه التي تستخدم لتعويض الفقد من الدائرة المغلقة للبخار المغلي والبخار المتكثف ، فيجب أن تكون من ماء غير عسر أو من ماء منزوع الملوحة .

كبريتات الكالسيوم

تُحدد ذوبانية كبريتات الكالسيوم بحاصل ضرب التركيز الجزيئي الجرامي C_{Ca} و C_{SO_4} لأيونات الكالسيوم والكبريتات ، على التوالي ، ولايتساوي هذان التركيزان بالضرورة . فعلى سبيل المثال ، يحتوى ماء البحر على كبريتات المغنسيوم وكبريتات الكالسيوم ولكن التركيز الجزيئي الجرامي للكبريتات يزيد عن ثلاثة أضعاف التركيز الجزيئى الجرامى للكالسيوم . ويسمى حاصل الضرب $C_{Ca} \times C_{SO_4}$ حاصل الضرب الأيوني ionic product لكبريتات الكالسيوم في المحلول تحت الدراسة . وترتفع قيمة تركيز الأيونات وحاصل الضرب الأيوني باستخلاص الماء النقي من المحلول . ويوضح شكل (٤ – ٣) هذه الزيادة كدالة في درجة التركيز بدءاً بماء بحر متوسط (الخط المنكسر) . وتُشيرَ درجات التركيز : ٢ و ٣ و ٤ إلى تبخير نصف ، وثلثي ، وثلاثة أرباع الماء ، على التوالي من ماء البحر المتوسط . ولقد تم حساب الخط المنكسر الموضح بالرسم من التركيزات الأولية للكالسيوم والكبريتات في مياه بحر متوسطة وذلك لتفادي حدوث أي ترسيب .

ويُعرَّف المحلول المشبع من كبريتات الكالسيوم بأنه المحلول الذي يحتوي على أعلى قيمة ممكنة لحاصل الضرب الأيوني في محلول مستقر عند درجة حرارة معينة . وتُعرَّف أعلى قيمة هذه بناتج الذوبانية solubility product . ويوضح شكل (٤ – ٣) ناتج الذوبانية لكبريتات الكالسيوم $Ca\ SO_4$. ويعتمد ناتج الذوبانية هذا نسبيا على تركيزات الأيونات الأخرى الموجودة في مياه البحر ، مثل الصوديوم والمغنسيوم والكلوريد . وعليه ، يتغيَّر ناتج الذوبانية بعض الشيء مع درجة التركيز . وتُمثِّل جميع النقاط الواقعة أسفل هذا الخط محاليل غير مشبعة ، وهى محاليل مستقرة



شكل (٤ – ٣)

ناتج الذوبانية لحالتين من كبريتات الكالسيوم في ماء بحر ملح مركز عند درجة ١٠٠ مئوية . وتأتي ذوبانية نصف الهيدرات أعلى من ذوبانية كبريتات الكالسيوم ويوضح الخط المنكسر زيادة حاصل الضرب الأيوني $C_{Ca} \times C_{SO_4}$ بزيادة تركيز ماء البحر . وتناظر القيمة $-\log[C_{Ca} \times C_{SO_4}]$ – ناتج ذوبانية قدره ١٠$^{-3}$ أو ٤٫٤ جرام من كبريتات الكالسيوم لكل لتر من مياه البحر .

ولاتترسب أي قشور منها . أما جميع النقاط فوق الخط فتمثل تركيزات فوق التشبع ، وهي بالتالي تمثل محاليل غير مستقرة وقابلة لترسيب القشور ، ويُمكن لهذه المحاليل أن تظل في حالة فوق التشبع لعدة ساعات .

هذا ومن الممكن أن توجد كبريتات الكالسيوم على هيئة نصف الهيدرات $CaSO_4 . 1/2H_2O$ الصلبة ، حيث يشارك فيها كل جزيئين من كبريتات الكالسيوم جزيئاً من الماء . وتذوب نصف الهيدرات أفضل من كبريتات الكالسيوم اللامائية ، كما هو واضح من ناتج الذوبانية في شكل (٤ – ٣) . وعمر المحاليل فوق المشبعة لنصف الهيدرات قصير نسبيا قبل أن تبدأ نصف الهيدرات الصلبة في الترسب . وتُعرف المنطقة الموجودة فوق ناتج الذوبانية لنصف الهيدرات في المحاليل تحت الدراسة ، بمنطقة تكَوُّن القشور .

والعوامل السابقة هامة جدا ، إذا مارغبنا في تقطير مياه البحر بدون ترسب قشور كبريتات الكالسيوم . وفي هذه العمليّة ، يتبع حاصل الضرب الأيوني الخط المنكسر في شكل (٤ – ٣) في اتجاه السهم . وبتركيز ماء البحر إلى ثلثي حجمه الأصلي (أي بدرجة تركيز حوالي ١٫٥) ، يتساوى حاصل الضرب الأيوني وناتج ذوبانية كبريتات الكالسيوم اللامائية . وباستمرار التبخير ، قد تترسب

كبريتات الكالسيوم اللامائية . ويمكن استمرار عملية التقطير بأمان مالم توجد بذور تشجع وتحث على حدوث التبلور . ولكن إذا ماتبخر ثلثا الماء (درجة تركيز ٣) وبدأ حاصل الضرب الأيوني يزيد عن ناتج ذوبانية كبريتات الكالسيوم اللامائية ، فإنه تبدأ خطورة تكون القشور . وفي مثل هذه الحالة ينصح بطرد الماء الملح عندما يصل إلى هذا التركيز .

ويوصف الاستقرار عند درجات حرارة أخرى برسومات بيانية مماثلة ولكنها تختلف بعض الشيء في قيمها العددية لناتج الذوبانية .

هيدروكسيد المغنسيوم

لايعتمد استقرار المياه الملحة بالنسبة لقشور كبريتات الكالسيوم على ملوحة المياه ، ولكن العكس صحيح لقشور هيدروكسيد المغنسيوم وكربونات الكالسيوم . ويترسب النوعان الأخيران من القشور من مياه متعادلة أو قِلْوية كما يُمكن إذابة هذه القشور بالأحماض التي لايمكنها إذابة كبريتات الكالسيوم .

والمعروف عن ذوبانية هيدروكسيد المغنسيوم يقل بكثير في دقته بالمقارنة بما يعرف عن ذوبانية كبريتات الكالسيوم . كما أن ناتج ذوبانية هيدروكسيد المغنسيوم ، $C_{Mg} \times (C_{OH})^2$ عند درجة ٢٥ مئوية يُقدَّر بحوالي ١٠$^{-١١}$ جزىء جرامي مكعب لكل لتر مكعب . وبطريقة أخرى عندما يزيد حاصل ضرب تركيز أيونات المغنسيوم مع مربع تركيز أيونات الهيدروكسيد عن ١٠$^{-١١}$ يبدأ ترسيب هيدروكسيد المغنسيوم .

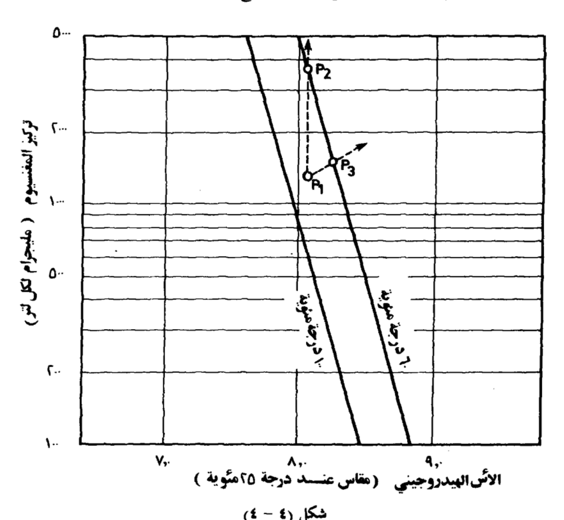
ولنأخذ ، على سبيل المثال ، ماء بحر متوسط له C_{Mg} = ٠٫٠٥٤ و C_{OH} = ١٠$^{-٦}$ جزىء جرامي لكل لتر حيث قيمة* الأس الهيدروجينيّ (pH) = ٨ . وعليه ، يكون حاصل الضرب الأيوني $C_{Mg} \times (C_{OH})^2$ حوالى ٥٫٤ × ١٠$^{-١٤}$ أي أقل من ناتج الذوبانية . وينتج من ذلك أن ماء البحر المتوسط لايتشبع بهيدروكسيد المغنسيوم عند درجة ٢٥ مئوية ، ولكن يتزايد تحلل الماء بسرعة كبيرة إلى أيونات الهيدروجين والهيدروكسيد بزيادة درجة الحرارة . وبتبخير ماء البحر عند درجات حرارة أعلى من ٧٠ مئوية ، نصل في الحال إلى نقطة حيث يزيد ناتج ذوبانية هيدروكسيد المغنسيوم فيترسب عندئذ . وتعتمد قيمة حد السماح للذوبانية على قيمة الأس الهيدروجيني لماء البحر كما هو موضح في شكل (٤ — ٤) والذي يحوي منحنيات الذوبانية عند درجة ٦٠ و ١٠٠ مئوية . وتُمثِّل النقاط الواقعة على يسار أي خط ، لأي من درجتي الحرارة الموضحتين بالشكل ، استقرار المحاليل بالنسبة لترسيب هيدروكسيد المغنسيوم ، بينما تمثل النقاط الواقعة على يمين الخط

---

* يعرف الأس الهيدروجيني pH بأنه اللوغاريتم العشري السالب لتركيز أيون الهيدروجين ، فعند ٢٥ درجة مئوية يكون حاصل الضرب الأيوني للماء $C_H \times C_H$ = ١٠$^{-١٤}$.

محاليل فوق التشبع . فعلى سبيل المثال ، تمثل النقطة P_1 مياه بحر ذات أس هيدروجيني = ٨ر١ وتركيز مغنسيوم قدره ١٣٠٠ جزء في المليون . وكما أوضحنا سابقاً ، فإن الماء لهذا التكوين يكون غير مستقر عند درجة ١٠٠ مئوية مما يرسب هيدروكسيد المغنسيوم إذا ماسخن الماء إلى درجة ١٠٠ مئوية وحتى بدون أي تبخير .

والماء السابق عند نقطة P_1 مستقر بالطبع عند درجة ٦٠ مئوية ولكن بزيادة التركيز إلى ٣٦٠٠ جزء في المليون (نقطة P_2) – مع المحافظة على قيمة الأس الهيدروجيني ثابتة – كما هو موضح بالخط المنكسر بالشكل ، فإن المحلول يصل إلى حالة التشبع وأية زيادة أخرى في التركيز تعطى محلولا



شكل (٤ – ٤)

علاقة الاستقرار لهيدروكسيد المغنسيوم في ماء البحر عند درجة ٦٠ و ١٠٠ مئوية . المنطقة على يمين الخط المعنى تمثل فوق التشبع ، أي يكون المحلول غير مستقر وبالتالي تترسب قشور هيدروكسيد المغنسيوم . الخطوط P_1P_2 و P_1P_3 تمثل تبخير ماء بحري متوسط الخواص عند قيمة ثابتة للأس الهيدروجيني وبزيادة الأس الهيدروجيني على التوالي . (لاحظ أن المحور الأفقي يشير إلى قيمة الأس الهيدروجيني مقاسة بعد تبريد المحلول إلى ٢٥ درجة مئوية ولاتقاس قيمة الأس الهيدروجيني عند درجة ٦٠ أو ١٠٠ مئوية) . مأخوذ عن لنجلير وآخرين .Langelier *et al* .

غير مستقر . ومن المستحيل تركيز المحلول مع ثبات قيمة الأس الهيدروجيني في عمليات التقطير لأن المحلول يفقد ثاني أكسيد الكربون نتيجة لتفكك أيونات البيكربونات :

$$HCO_3^- \rightarrow CO_2 + OH^-$$

وبناء على ذلك ، يزيد تركيز الهيدروكسيد وكذلك قيمة الأس الهيدروجيني مما يغير تكوين المحلول خلال خط يميل إلى اليمين مثل P_1P_3 حيث نصل إلى التشبع أسرع مما لو ثبت مقدار الأس الهيدروجيني كما وضح سابقا .

ولفقدان ثاني أكسيد الكربون خلال التبخير أهمية بالغة في ترسيب قشور كربونات الكالسيوم .

كربونات الكالسيوم

كربونات الكالسيوم ضعيفة الذوبان جداً في الماء ، فالذوبانية حوالي ٠١ر٠ جرام لكل لتر عند درجة ٢٥ مئوية . ويمكن لهذه الذوبانية أن تزداد بكثرة بإضافة حَمض . وحتى الأحماض الضعيفة ، مثل حمض الكربونيك ، لها فاعلية في تحسين هذه الذوبانية . ويتكون حمض الكربونيك بإذابة ثاني أكسيد الكربون في الماء . وكلما ارتفع ضغط ثاني أكسيد الكربون كلما تحسنت الذوبانية ، فعند ضغوط ١ و ١٠ و ٥٠ ضغطاً جوياً تصبح الذوبانية ٨٤ر٠ و ٧٣ر١ و ٨٨ر٢ جرام لكل لتر ، على التوالي . وتقل الذوبانية بانخفاض درجة الحرارة .

وتوجد كثير من المياه الطبيعية ، ومنها مياه البحر ، مشبعة بكربونات الكالسيوم ، وبتسخين هذه المياه تترسب بعض مكونات الكالسيوم حتى إذا لم يفُقد أيٌّ من غاز ثاني أكسيد الكربون من المحلول وحتى إذا لم يكن هناك أي تبخير . وبالطبع ، يسبب تسخين الماء عملياً فقد ثاني أكسيد الكربون من الماء . ولهذا السبب ، بالإضافة إلى التزايد المستمر في التركيز بتبخير الماء ، تترسب قشور كربونات الكالسيوم .

وتسمى هذه القشور – عادة – بالقشور اللينة . ولقد اكتشفت هذه القشور وحُورِبت منذ بداية عهد الغلايات البخارية . وهى أول القشور التي تبدأ في الترسب من الماء العذب . ويحدد استقرار أي مياه بالنسبة لهذا النوع من القشور بدلالة ناتج الذوبانية $C_{Ca} \times C_{CO_3}$ لتركيز أيون الكالسيوم وأيون الكربونات عند التشبع . ومن السهل نسبياً تحديد تركيز أيونات الكالسيوم بالتحليل الكيميائي الذي لايمكن استخدامه لتحديد تركيز أيونات الكربونات والتي تتفاعل جزئياً مع أيونات الهيدروجين وتنتج أيونات البيكربونات HCO_3^- :

$$CO_3^{2-} + H^+ \rightleftharpoons HCO_3^-$$

ويعتمد استمرار هذا التفاعل على تركيز أيونات الهيدروجين كما نرى من معادلة الاتزان . وتقل قيمة الأس الهيدروجيني لمعظم المياه الملحة عن ٩ مما يجعل التفاعل في هذه المياه مكتملًا تقريبا . ويمكن القول إن تركيز أيونات الكربونات صغير جدا ، وبدلا من بذل أية محاولة لقياسها ، فإنه من المناسب تحديد تركيز كلٍّ من أيونات البيكربونات والهيدروجين ، والتي يمكن استخدامها عند أية درجة حرارة لتحديد تركيز أيونات الكربونات بدون أي لبس* . ويمكن تعيين تركيز أيونات البيكربونات بالمعايرة البسيطة باستخدام حمض . أما تركيز أيونات الهيدروجين ، فيعين بقياسات حرارية أو بقياسات كهربائية . لهذا ، تُعطي الرسوم البيانية لاستقرار الماء بالنسبة لكربونات الكالسيوم بدلالة هذين المتغيرين ، بالإضافة إلى تركيز أيونات الكالسيوم ، كما هو موضح في شكل (٤ – ٥) .

ويفصل كل خط في الشكل بين المنطقة المستقرة (اليسار) والمنطقة غير المستقرة (اليمين) للماء عند تركيز معين من أيونات البيكربونات ويشار إليها هنا بالقِلْوِيَّة ويعبر عنها بوحدات مليجرام كربونات كالسيوم لكل لتر . والقلوية هي ببساطة تركيز أيونات البيكربونات (بالمليجرام لكل لتر) مضروبة في الرقم ٨٢ر٠** . ومن الرسومات البيانية ، يمكننا أن نرى ما إذا كان ماءٌ ما مستقراً بالنسبة لكربونات الكالسيوم عند درجتي ٦٠ و ١٠٠ مئوية أم لا . فمثلا خذ نقطة P_1 في شكل (٤ – ٥) والتي تمثل ماء بحر أسه الهيدروجيني يساوي ١ر٨ وتركيز كالسيوم مقداره ٤٠٠ مليجرام لكل لتر . ولقد أظهرت التحاليل الكيماوية أن القلوية الكلية لماء البحر هذا حوالي ١١٧ مليجرام/لتر ويعبر عنها ككربونات الكالسيوم . وكما هو واضح من الرسم ، تأتي النقطة إلى اليمين من خط القلوية ١١٧ مليجرام/لتر . ولما كان ماء البحر المتوسط غير مستقر عند هذه الدرجة من الحرارة ، فإن قشور كربونات الكالسيوم في العادة تترسب منه . ويسمى الفرق بين قيمة الأس الهيدروجيني للعينة وقيمتها المناظرة للتشبع (عند نفس القيم لتركيز الكالسيوم والقلوية الكلية) بدليل التشبع .

---

* لأن المقدار $C_{HCO_3} / (C_H \times C_{CO_3})$ ثابت لدرجة حرارة معينة . فمثلا عند درجة ٢٥ مئوية تكون قيمة هذا الثابت ٣ر٢ × ١٠^١٠ في الماء النقي وتتأثر القيمة إلى حد ما بوجود الأملاح الأخرى .

** التعريف الدقيق للقلوية يكون $50 \times [C_{HCO_3} + 2C_{CO_2}]$ ولكن إذا كان الأس الهيدروجيني أقل من ٩ فإنه يمكن إهمال تركيز أيونات الكربونات (C_{CO_3}) . والقيمة ٨٢ر٠ تمثل النسبة ٥٠ ÷ ٦١ أو الوزن المكافىء لكل من $CaCO_3$، HCO_3^- .

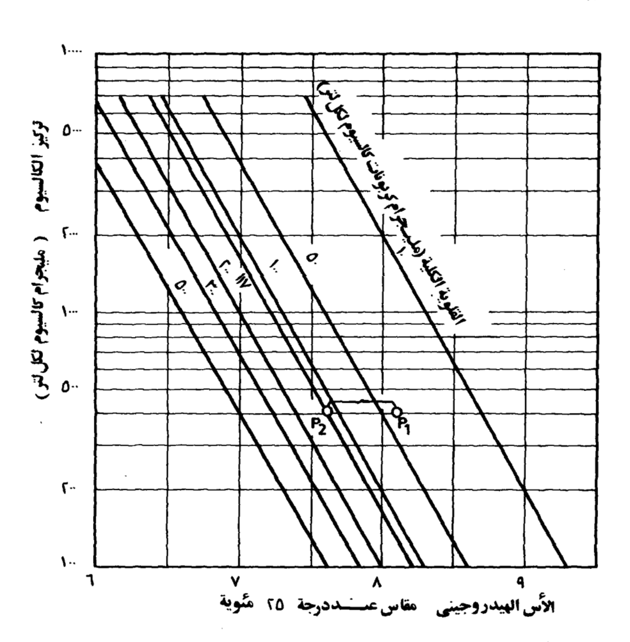
وتوضح الرسوم البيانية لاستقرار كربونات الكالسيوم عند درجتي ٦٠ و ١٠٠ مئوية انخفاض الاستقرار بزيادة درجة الحرارة ، مع استخدام ماء البحر في كل من الرسمين . وباستخدام أنواع أخرى من المياه لها مكونات مختلفة ، يطرأ تغير طفيف على علاقات الاستقرار نتيجة تأثير المكونات التي لاتترسب مثل الصوديوم والبوتاسيوم ، والتي تكون في العادة صغيرة مالم تكن التركيزات مرتفعة جدا .

وبأخذ نتائج الاستقرار لكل من كبريتات الكالسيوم وهيدروكسيد المغنسيوم وكربونات الكالسيوم في ماء البحر ، يمكن استنتاج الآتي : تترسب قشور كربونات الكالسيوم عند درجات حرارة منخفضة نسبيا (مثل ٦٠°م) لأن ماء البحر مشبع عمليا بكربونات الكالسيوم . وتتكون قشور هيدروكسيد المغنسيوم عند درجات الحرارة المرتفعة أو عندما يتشبع ماء البحر نسبيا بهذا الملح . وبترسيب هيدروكسيد المغنسيوم ينتج حمض مما يكبح ترسيبْ كربونات الكالسيوم :

$$Mg^{2+} + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + 2H^+$$

أما خطورة تكوين قشور كبريتات الكالسيوم فتبدأ عند درجة ١٠٠°م وفقط إذا تركز ماء البحر إلى ثلثي حجمه ، وتزداد هذه القشور شدة اذا تبخر ثلث آخر . لذا ، فإنه ليس من المستغرب أن تتكون القشور المتكونة في مقطرات ماء البحر التي تعمل عند درجات حرارة منخفضة (حتى درجة ٦٠ مئوية) أساسا من كربونات الكالسيوم . أما في الوحدات التي تعمل مابين درجتي ٦٠ و ١٠٠ مئوية فتتكون فيها القشور من خليط من كربونات الكالسيوم وهيدروكسيد المغنسيوم ، وتزداد نسبة هيدروكسيد المغنسيوم بارتفاع درجة الحرارة . ولقد أظهرت تحاليل المقطرات التي تعمل عند درجات حرارة أعلى من ١٠٠ درجة مئوية أن القشور المتكونة بها تحتوي على نسبة مرتفعة من كبريتات الكالسيوم التي تزداد نسبتها بارتفاع درجة الحرارة . ولايعتمد معدل تكوين القشور على درجة فوق التشبع للمكونات فقط وإنما يعتمد كذلك على عوامل أخرى كثيرة ، مثل ، بنيان السطح وغالبا على شكل الدوران وعدد مرات تغيير الماء الملح في المقطر ، وكل هذه القواعد ومدى اعتماد تكوين القشور على درجة حرارة التشغيل تقريبية بحتة .

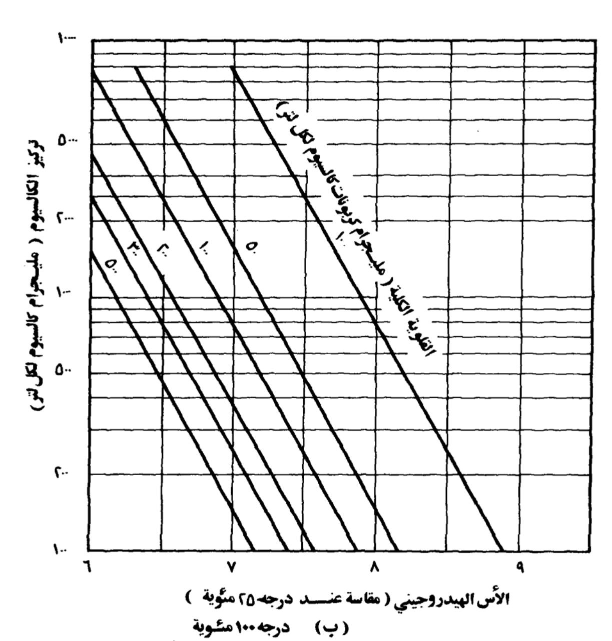
وعلى سبيل المثال ، تحتوي في العادة عينات القشور المتكونة في مبخرات الانضغاط الحراري thermocompression evaporators التي تعمل عند درجة ١٠٠ مئوية على هيدروكسيد المغنسيوم مع اختفاء كربونات الكالسيوم من العينة كلياً . ويبدو هذا كأن كربونات الكالسيوم قد تكون موجودة في محلول فوق التشبع أو على الأقل تُكوِّن معلقات دقيقة لمدة أطول من هيدروكسيد المغنسيوم .



(أ) درجة ٦٠ مئوية

شكل (٤ - ٥)

علاقة استقرار كربونات الكالسيوم لقلويات مختلفة : (أ) عند درجة ٦٠ مئوية ، (ب) عند درجة ١٠٠ مئوية . تم حساب الخطوط لماء بحر متوسط الخواص ، وهي سارية لأنواع الماء الأخرى ذات التكوين المماثل . ويُشير كل خطٍ إلى ماء بقلوية معينة . وتمثل المنطقة على يمين الخط المعني درجة فوق التشبع ، أي محلول غير مستقر ، وبالتالي يتوقع ترسيب قشور كربونات الكالسيوم . وتعرف القلوية في الرسم بوحدات (ملّيجرام كربونات كالسيوم لكل لتر) وتمثل النقطة P_1 تركيز الكالسيوم وقيمة الأس الهيدروجيني لماء البحر المتوسط . أما فرق الأس الهيدروجيني بين النقطتين P_1 و P_2 فحوالي ٥ر٠ وهو يمثل دليل التشبع . مأخوذ من لانجلير وآخرين «Langelier *et al.*» .



أما في الماء الأخضم بخصائصه المختلفة ، فإن مناطق درجات حرارة الأنواع المختلفة من القشور تختلف طبقاً لتركيزات الأيونات في الماء .

منع التقشر

بالرغم من وجود العديد من الطرق لمنع التقشر (تكون القشور) في عمليات التقطير ، إلا أن معظمها باهظ التكاليف . ويعتمد اختيار الطريقة الصحيحة على الآتى : (١) طبيعة الماء الخام ، (٢)

ظروف تشغيل العملية . أما في حالات إزالة الملوحة الأخرى فيُعرف القليل فقط عن منع تكون القشور .

ويمكن تصنيف طرق منع تكون القشور في التقطير إلى عدة تقسيمات :

١ – تصميم الوحدة والعملية بحيث لاتوجد أية فرصة لتكون القشور من المحلول فوق المشبع قبل مغادرته للوحدة .

٢ – إزالة الأملاح المكونة للقشور قبل عملية التقطير (إزالة العسر) .

٣ – إضافة كيماويات مثل الأحماض وذلك لمد مدى درجات الحرارة الذي يكون فيه الماء مستقرا .

٤ – إضافة مركبات لتأخير ترسيب القشور مثل البوليفوسفات ، أو لتسمح بترسيب القشور اللينة السهل إزالتها بدلا من تلك التي تلتصق بالأسطح الصلبة .

٥ – حدوث الترسيب في أبراج خاصة سهلة التنظيف .

وأهم عامل في منع التقشر هو اختيار أقل درجة حرارة ممكنة للتشغيل لأن حالة فوق التشبع تزداد بارتفاع درجة الحرارة ، ولسوء الحظ تحتاج عادة هذه الطريقة للتشغيل إلى معدات كبيرة . ومن الضروري الوصول إلى أفضل تكلفة اقتصادية وذلك بالتوازن بين خفض تكون القشور وتكلفة التشغيل من جهة ، وانخفاض قيمة رأس المال المستثمر من جهة أخرى . وبالطبع ، هناك تأثير كبير للتصميم وظروف تشغيل العملية على تحديد أفضل وضع اقتصادي ، ويفضل الأسطح الملساء لانتقال الحرارة لأنها تعطي نُوَيات قليلة للبلورة . ويبدو من المعقول أن ينخفض زمن بقاء الماء في الوحدة إلى الحد الأدنى ، وألا توجد أية جيوب حيث يصبح الماء ساكنا . ومن المفيد أيضاً المحافظة على سرعات عالية لدوران الماء الملح .

ويلزم في بعض الأحيان إزالة عسر الماء الملح قبل الإزالة الكاملة للأملاح . ومع بعض الاستثناءات ، فإن الماء الملح يعتبر عسراً نسبيا ، كما أن تكلفة كل من كيماويات المعالجة ومحطات إزالة العسر مرتفعة إلى حد ما . ويحتوى ماء البحر بالتقريب على حوالي ٦ كيلو جرامات من الأملاح العسرة (مُمثلةً في كربونات الكالسيوم) لكل متر مكعب . (يمثل هذا حوالي ٥٠ مثلًا أعلى من الموجود في المياه السطحية المعالجة في محطات البلدية .) وتقدر كمية الكيماويات اللازمة لإزالة العسر بقيمة مقاربة لمقدار الأملاح . وعليه ، تستهلك محطة إنتاجيتها حوالي ٥٠٠٠ متر مكعب يوميا حوالي عدة عشرات من الأطنان من الكيماويات يومياً ، بالإضافة إلى وجود محطة كبيرة لإزالة العسر . وفي بعض الأحيان ، يمكن الاستفادة من الكالسيوم والمغنسيوم في إنتاج كيماويات قد تكون مطلوبة في نفس المنطقة التي تتطلب إزالة ملوحة مياه البحر بها . عندئذ تصبح إزالة العسر لكمية محدودة مجدية اقتصادياً ، خصوصا للماء الأخضم والذي له عسر أقل من مياه البحر .

وتأتي طريقة حقن الحمض لخفض قيمة الأس الهيدروجيني كواحدة من أرخص طرق منع تكوُّن القشور . ويُمثَّل هذا في أشكال (٤ – ٤) و (٤ – ٥) بالحركة إلى يسار النقطة التي تمثل مكونات الماء لخفض قيمة الأس الهيدروجيني وبالتالي تصبح في منطقة أكثر استقرارا . وعلى أي حال ، ليس هناك أي تأثير عملي لحقن الحمض على درجة فوق التشبع لكبريتات الكالسيوم ، إلا إذا استخدم حمض الكبريتيك حيث تزداد درجة التشبع فعلياً بإضافة أيونات الكبريتات مع الحمض ، أما إذا كان الماء المستخدم هو ماء البحر ، فإن هذه الزيادة تهمل بالمقارنة بتركيز الكبريتات الموجودة أصلا .

ويمكن استخدام حمض الكبريتيك أو حمض الهيدروكلوريك الرخيص الثمن ، ولكن هناك عيباً رئيساً وهو أن الجرعات الزائدة قد تسبب مشاكل تآكل . وفي المنشآت الكبيرة قد يكون أجدى أن نتحكم في قيمة الأس الهيدروجيني باستخدام أجهزة لحظية ذات تغذية مرتدة feedback devices . أما في الإنشاءات الصغيرة فتستخدم الأحماض الضعيفة ، مثل حمض السيتريك ، بالرغم من أن هذه الأحماض أكثر تكلفة . كما يمكن بدلا من استخدام محاليل صحيحة للأحماض أن تستخدم محاليل من الأملاح التي تتفكك جزئيا إلى أحماض بالتميُّؤ عند وضعها في محاليل مائية ، مثل محاليل كلوريد الحديديك بمعدل حوالي ١٥٠ جراماً من كلوريد الحديديك السداسي الجزيئات التجاري لكل طن من ماء البحر . ولقد أمكن التحكم بسهولة في الجرعة بالإنتاج الكهروليتي لكلوريد الحديديك في الموقع مباشرة في مياه البحر . وفي هذه العملية ، تستخدم أنودات الحديد للتضحية بالإذابة في مياه البحر مكونة أولًا حديدوز ثم بعدئذ كلوريد الحديديك .

ولقد وجد الكثير من المركبات التي يمكنها تأخير ترسيب القشور بدلا من منعها . ويعتمد اختيار المنتج المناسب على طبيعة المياه وظروف التشغيل . ولقد وجد الكثير من طرق معالجة القشور القديمة بالخبرة وليس بالبحث . وهناك قصة مشهورة ، ولكنها غير مؤكدة ، عن استخدام النشا كمانع لتكون القشور . فمنذ عدة سنوات مضت ، يقال إن عدداً من العمال قاموا بصيانة غلاية كبيرة جداً ثم قرروا تناول غذائهم داخل جسم الغلاية ، وسهواً ترك أحدهم بعض البطاطس داخل الغلاية وقاموا بعد ذلك بتشغيل الغلاية . ولقد لوحظ بعد ذلك تكون قشور لينة خلال التشغيل التالي للصيانة ، كما أمكن تشغيل الغلاية لفترة أطول قبلما تبدأ عملية التنظيف مرة أخرى .

ولقد استخدمت خلطات من نشا الذرة ، والصودا وفوسفات ثنائية الصوديوم disodium phosphate في معالجة الماء لعدة سنوات وأثبتت كفاءتها . ولقد وجد أن خليطاً من ثلاثي عديد فوسفات الصوديوم sodium tripolyphosphate مع مشتقات حمض السلفونيك الخشبية ، وإسترات الجلايكولات متعددة الألكيلين esters of polyalkylene glycols مناسبة للاستخدام ، خصوصا لخفض تكون القشور في التقطير الفجائي لماء البحر بشرط ألا تزيد أقصى درجة حرارة

للماء الملح عن ٨٦ مئوية . وتعادل الجرعة حوالي ٥ جزء في المليون في ماء البحر ، أي يعادل ١٠ جرام لكل متر مكعب من الماء العذب بفرض تبخير نصف الماء من الماء الملح . وتلعب تقنية معالجة المياه التقليدية ، والتي تطورت جيدا في المائة عام الماضية ، دوراً هاما في تخطيط وتشغيل محطات إزالة الملوحة . وبدلا من استخدام عديد الفوسفات ، وهى محاليل متعددة الإلكتروليتية غير عضوية inorganic polyelectrolytes ، يُمكن لبعض البوليمرات العضوية الذوابة في الماء أن تبشر بإمكانية استخدامها كمانع جيد لتكوُّن القشور ، مثل الأحماض الكربوكسيلية المتبلمرة polymeric carboxylic acids .

ويعتمد تأثير معظم المواد الإضافية لمعالجة تكوُّن القشور على ظواهر رغوية . وبالرغم من أن إضافة عديد الفوسفات تُكوِّن مركبات ذوابة من الكالسيوم ، إلا أن الكميات التي تُضاف من هذا العامل للمعالجة ضئيلة جدا مما يصعب معه شرح تأثيرها بهذه الطريقة . ومن المعتقد أن فاعلية كلوريد الحديديك في معالجة تكوُّن القشور تُسببها جزئياً المركبات الرغوية للحديد التي تتكون بالتحلل المائي hydrolysis والتي تعمل كواقٍ رغوي لتأخير ترسيب مركبات القشور .

ومن المعتاد ، في كثير من الأحيان ، وضع بذور من المعادن التي تُكوِّن القشور في المياه الملحة المغلية في كثير من الصناعات الكيميائية . وتعمل هذه البذور كنويات لتكوين حمأة sludge لينة في السائل بدلا من تكون القشور على الأسطح الصلبة . وكمثال على ذلك ، فإنه يمكن منع تكوُّن قشور كبريتات الكالسيوم في مُبخِّرات إنتاج الملح المعتاد بوضع بلورات كبريتات الكالسيوم معلقة في السائل . وليس من اللازم استخدام بذور مماثلة لمعادن القشور ، ويمكن استخدام مساحيق عديدة كنُوَيَّات . وتعتمد طريقة الاتزان التلامسي contact stabilization على قاعدة مماثلة . ففي هذه الطريقة يسحب الماء الملح فوق المشبع من المبخر قبلما يتاح له الوقت لترسيب القشور . ثم يضخ هذا الماء الملح إلى أعلى خلال فرشة من الرمال حيث يتم ترسيب القشور ، ثم يعود الماء الملح مرة أخرى إلى المبخر . وتنظف فرشة التلاصق على فترات متناوبة .

ويمكن ، في بعض الأحيان ، خفض تكاليف إزالة القشور باستعمال تصميمات خاصة للمعدات ، مثل استخدام عناصر تسخين من النوع القفصي basket-type ذي صفيحة من معدن المونل بها أخاديد عميقة . ويتكثف البخار داخل القفص مما يؤدى إلى تسخين ماء البحر خارجه . وبعدما تترسب كمية معينة من القشور على السطح الخارجي للقفص يتم إحلال سريع لماء بارد بدلًا من الماء الملح الساخن . وكنتيجة لهذا التبريد المفاجىء تنكمش الأخاديد مما يزيل على الأقل جزءاً من القشور القصيفة brittle scale .

مراجع مختارة

كيمياء التقشر Chemistry of Scale Formation

Langelier, W.F., "Chemical Equilibria in Water Treatment." *J.Am. Water Works Assoc.* **38**:169 (1946).

Langelier, W.F., "Mechanism and Control of Scale Formation in Sea Water Distilation." *J. Am. Water Works Assoc.* **46**:461 (1954).

Glater, J., and Schwartz, J., "High-Temperature Solubilities of Calcium Sulfate Hemihydrate and Anhydrite in Natural Sea-Water Concentrates." *J. Chem. Eng. Data* **21**:47 (1976).

الطرق التقليدية لمنع التقشر Conventional Methods of Scale Prevention

Badger, W.L., *et al., "Critical Review of Literature on Formation and Prevention of Scale,"* Office of Saline Water Report No.25, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C. 1959.

Badger, W.L., and Banchero, J.T., "Research and Development on Scale Prevention in the United States," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion, 1957,* National Academy of Sciences-National Research Council Publication No.568, Washington, D.C., 1958. p.44.

Neville-Jones, D., "Research and Development in Distillation and Scale Prevention in the United Kingdom," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion, 1957,* National Academy of Sciences- National Research Council Publication No.568, Washington, D.C., 1958, p.35.

التحكم في تكوُّن القشور بالبذر Scale Control by "Seeding"

Chernozubov, V.B., Zaostrovskii, F.P., Shatsillo, V.G., Golub, S.I., Novikov, E.P., and Tkach, V.I., "Prevention of Scale Formation in Distillation Desalination Plants by Means of Seeding," *Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination,* Vol.2, Washington, D.C., 1965, p.539, for sale by Superintendent of Documents, Washington, D.C. 20242.

Simpson, H.C., and Hutchinson, M., "Calcium-Sulfate Scale Deposition in Sea-Water Evaporators," *Desalination* **2**:308 (1967).

Scale Control by Antiscaling Compounds التحكم في القشور بمركبات منع التقشر

Baldwin-Lima-Hamilton Corp., "*Scale Control for Saline-Water Conversion Distillation Plants,*" Office of Saline Water Research and Development Report No.186, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C., 1966. Deals with several proprietary compounds, containing, e.g., starch, lignin sulfonates, phosphates, and/or polymeric phosphates.

Langelier, W.F., Caldwell, D.H., and Lawrence, W.B., "Scale Control in Sea-water Distillation Equipment," *Ind. Eng. Chem.* **42**:146 (1950).

Shaheen, E.I., and Dixit, S.N.S., "Scale Reduction in Saline Water Conversion," *Desalination* **13**:187 (1973). Deals with organic polymers (polyacrylates and polymethacrylates).

٥ طرق التقطير

■ معاملات انتقال الحرارة ■ مصادر الحرارة ■ التقطير متعدد التأثيرات
■ التقطير الفجائي ■ التقطير بانضغاط البخار ■ اتحاد التقطير مع توليد القدرة
■ التبخير الشمسى ■ مراجع مختارة

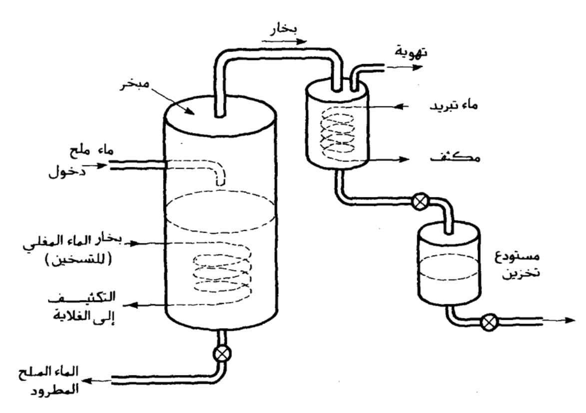
تعتمد كل طرق التقطير على الحقيقة المؤكدة أن الماء والغازات الذائبة فيه قابلة للتطاير دون الأملاح . أما إذا تمت عملية التقطير عند درجات حرارة أعلى من درجة ٣٠٠ مئوية ، فإنه من المتوقع تطاير الأملاح أيضا . (بالرغم من إمكانية مثل هذه الطرق للتقطير إلا أنها لاتعتبر عملية في المرحلة الراهنة من التكنولوجيا الحديثة نظرا لارتفاع ضغط بخار الماء المغلى steam بالإضافة إلى مشاكل التآكل المصاحبة) . ومن الناحية العملية لكل عمليات التقطير يمكن القول إنه بالتسخين المستمر للماء الملح ، يتبخر الماء فقط تاركا الملح خلفه . وبتكثيف البخار الناتج نحصل على ماء نقي .

ويعتبر التقطير أفضل طريقة معروفة لتنقية المياه . ومعظم المياه العذبة المنتجة من مياه البحر في العالم تنتج بإحدى طرق التقطير .

ويوضح شكل (٥ – ١) الفكرة الأساسية للتقطير ، حيث يغلي ماء البحر في المبخر بتمرير بخار ماء مغلي ساخن داخل أنابيب المبخر ، مما يسبب تكثف البخار داخل الأنابيب قبلما يعود الى الغلاية مرة أخرى . أما البخار الناتج من المبخر فإنه يرد في المكثف مكونا ماءً نقياً يُجمع في مستودع التخزين . ويتم التحكم في ضغط الهواء وكميته داخل النظام من خلال ثقب صغير يتصل بمضخة أو طارد . أما الماء الملح المركز فيتم سحبه باستمرار أو على فترات متقطعة من المبخر .

ويُمكن تمرير مياه البحر داخل أنابيب المبخر بدلا من البخار الذي يستخدم لتسخين السطح الخارجي لأنابيب المبخر كما هو مبين في شكل (٥ – ٢) .

وتُعتبر درجة حرارة ماء البحر المغلي متغيراً هاماً جداً في عملية التقطير حيث تُحدد هذه الدرجة خواص البخار المستخدم . ويجب أن تزيد درجة حرارة بخار التسخين عن درجة حرارة ماء

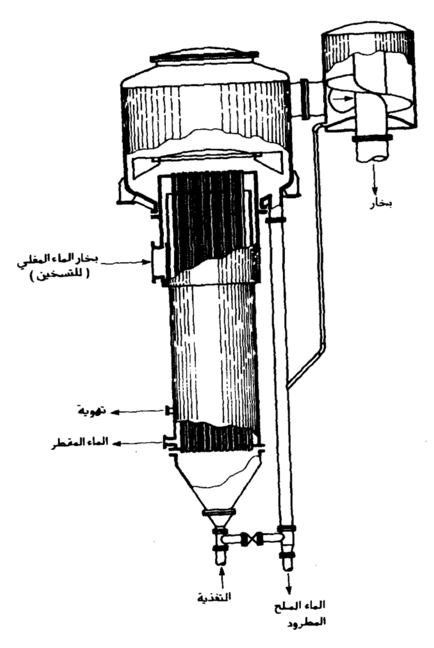


شكل (٥ – ١)

الفكرة الأساسية للتقطير أحادي المرحلة

البحر المغلي . واذ لم يتحقق هذا الشرط ، فإن كمية الحرارة الكبيرة الناتجة عن تكثيف بخار التسخين لايمكنها الانتقال إلى ماء البحر المغلي (مع عدم وجود أية عمليات سريان يمكنها التأثير على اتجاه سريان الحرارة) ، لأن الحرارة تسري دائما من الأماكن ذات درجات الحرارة العالية إلى الأماكن ذات درجات الحرارة المنخفضة . ولايمكن عادة تغيير درجة حرارة وضغط بخار التسخين حسب الرغبة . وعليه ، فإنه من المهم ضبط درجة حرارة ماء البحر المغلي ليناسب خواص بخار التسخين . ويتم ذلك بالتحكم في الضغط داخل المقطر . ويمكن فهم هذا بصورة أفضل بدراسة منحنيات البخار والضغط للماء النقي وللماء الملح .

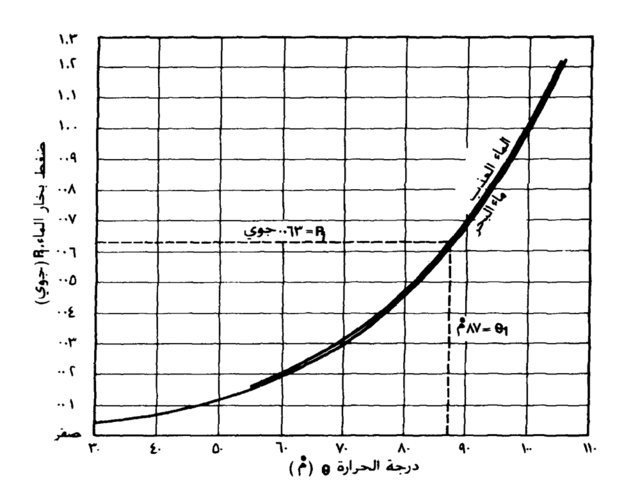
ويوضح شكل (٥ – ٣) العلاقة بين ضغط البخار للماء النقي ولماء البحر كدالة في درجة الحرارة . وتوضح هذه المنحنيات ضغط البخار المقاس فوق ماء في وعاء مفرغ . أما إذا وجد الهواء (أي إذا لم تكن هناك خلخلة) فإن الضغط الكلي يرتفع بارتفاع درجة الحرارة ، أي أن إسهام جزيئات الماء في الضغط الكلي للغاز فوق الماء يبقى تقريبا ثابتا .



شكل (٥ – ٢)

مبخر الأنبوب الطويلة الرأسية . عن بادجر واستنفورد (١٩٥٨) Badger and Standiford

ويرتفع ضغط بخار الماء بارتفاع درجة الحرارة . ويمكن من شكل (٥ – ٣) إيجاد درجة الحرارة θ_1 التي يمكن عندها أن يصل ضغط بخار الماء P_1 إلى مستوى معين . وعلى العكس ، إذا سحبنا حرارة من بخار الماء عند ضغط P_1 ، وعند ثبوت الضغط الكلي مع تغير الحجم فسوف يتكثف البخار إلى ماءٍ نقيٍّ عند درجة الحرارة θ_1 . وهذه الدرجة هي أيضا درجة حرارة الغليان ،



شكل (٥ –٣)

زيادة ضغط بخار الماء للماء النقي ولماء البحر مع درجة الحرارة . θ_1 تُمثل درجة حرارة الغليان عند ضغط جوي P_1 وهى تمثل أيضاً درجة حرارة التكثيف عندما يساوى الضغط الجزئي لبخار الماء P_1 .

إذا كان الضغط الجوي المحيط هو P_1 ، وذلك لأن الغليان يَحدث عندما يصل ضغط بخار الماء إلى قيمة الضغط الجوي المحيط ويُزيح بخارُ الماء المتصاعد الهواء الموجود على سطح الماء .

ويمكننا الاستنتاج من شكل (٥ – ٣) أن ضغط بخار ماء البحر عند درجة حرارة معينة أقل منه للماء النقي ، وبالتالي تصبح درجة غليان ماء البحر عند ضغط ما أكبر منها للماء النقي . ويكون الفرق في ضغط البخار حوالي ١٫٨٤٪ من ضغط بخار الماء النقي بينما يكون ارتفاع نقطة الغليان حوالي ٠٫٤٦ ، و ٠٫٥٣ ، و ٠٫٦٠ درجة مئوية عند درجة حرارة ٧٥ و ١٠٠ و ١٢٥ مئوية ، على الترتيب . وبينما تبدو هذه الفروق بسيطة للوهلة الأولى ، إلا أنها يجب أن تؤخذ في الاعتبار في عمليات التقطير المتعدد التأثيرات ، وتزداد أهمية هذه الفروق كلما زاد عدد المراحل .

ويُستخدم بخار الماء المغلي عادة للتسخين في وحدات التقطير الكبيرة ، إلا أنه يمكن أيضا التسخين بوسائل أخرى . ويُعتبر التسخين بالكهرباء مناسباً ، إلا أنه مرتفع التكاليف . ولقد كان من الشائع في بداية تقنية التقطير استخدام التسخين باللهب المباشر ، ولكن لم تعد تستخدم هذه الطريقة نتيجة تسببها في تكون القشور الصلبة على سطح التسخين بالإضافة إلى التسخين الزائد للمبخر . ويتميز استخدام بخار الماء المغلي في التسخين بالآتي : (١) سهولة التحكم في درجة الحرارة ، (٢) الارتفاع النسبي في حرارته الكامنة التي يعطيها عند تكثفه .

وتمثل الحرارة الكامنة لتكثيف الماء عند درجة ١٠٠ مئوية حوالي ٥٣٩ كيلو سعر/كجم ، ويعني هذا أن كل كيلو جرام واحد من البخار يعطي هذه الكمية من الحرارة عندما يتكثف إلى ماء عند درجة ١٠٠م . ويحتاج الماء إلى نفس كمية الحرارة ليتحول إلى بخار عند نفس درجة الحرارة . وعليه ، تسمى هذه الحرارة أيضا بحرارة التبخير . ومن السهل ملاحظة أن هذه الكمية من الحرارة أكبر بكثير بالمقارنة بالحرارة النوعية للماء ، وذلك حيث يلزم كيلو سعر واحد لتسخين كيلو جرام واحد من الماء بمقدار درجة واحدة مئوية ، وبالتالي تكون كمية الحرارة الناتجة من تكثيف كيلو جرام واحد من البخار عند درجة ١٠٠ مئوية كافية لتسخين ٥ر٤ كيلو جرام من الماء من درجة التجمد إلى درجة الغليان عند الضغط الجوي . ولما كانت الحرارة الكامنة لانصهار الثلج حوالي ٧ر٧٩ كيلو سعر لكل كيلو جرام ، فإن الحرارة الناتجة من تكثيف البخار يمكنها صهر ٧ كيلو جرام من الثلج . وتختلف حرارة التبخير الكامنة إلى حد ما مع تغير درجة الحرارة ، فهى ٥٥٤ ، ٥٣٩ ، ٥٢٢ كيلو سعر/كجم للماء عند درجات حرارة : ٧٥ ، ١٠٠ ، ١٢٥م ، على التوالي . وبالتقريب ، تتساوى حرارة التبخير الكامنة لماء البحر معها للماء العذب ، أما الحرارة النوعية لماء البحر المألوف فتقل نسبيا عنها للماء النقي ، وهى حوالي ٩٦٤ر. كيلو سعر/كجم – °م لماء بحر عند درجة ٢٣م بالمقارنة بحوالي ٩٩٨ر. للماء النقي و ٩٢ر. لماء بحر له ضعف تركيز ماء البحر السابق .

معاملات انتقال الحرارة

من أهم العناصر التي تؤثر على حجم وحدة التقطير هو معدل انتقال الحرارة خلال أنابيب لتسخين ، أي مابين البخار المتكثف والماء . ويُعطَي هذا المعدل بالمعادلة الآتية :

$$\mathcal{J}_Q/t = U \times A \times \Delta T$$

حيث معنى الرموز المختلفة ووحداتها في النظامين المعتادين للوحدات كالآتي :

الرمز	المعنى	نظام Cgs	النظام الهندسي
$\mathcal{Q}_o$	كمية الحرارة السارية من البخار خارج الأنبوب إلى الماء داخل الأنبوب	سُعر	وحدة حرارة بريطانية
A	المساحة التي تسري خلالها الحرارة	سم^٢	قدم مربع
ΔT	فرق درجات الحرارة بين البخار والماء داخل الأنبوب	°م	درجة فهرنهيت
t	زمن سريان الحرارة	ثانية	ساعة
U	معامل انتقال الحرارة الكلي خلال جدار الأنبوب	سُعر سم^-٢.°م^-١ ثانية^-١	وحده حرارة بريطانية قدم^-٢ درجة فهرنهيت^-٢ ساعة^-١

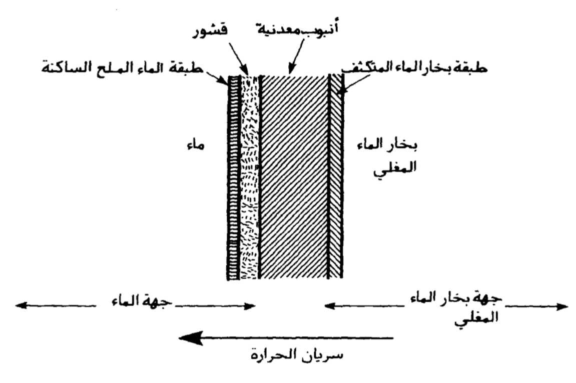
وتؤخذ المساحة A مساوية للمتوسط اللوغاريتمي بين المساحة الداخلية والمساحة الخارجية للأنبوب* .

وببساطة يؤخذ معامل انتقال الحرارة لمادة متجانسة – كالنحاس – مساويا للموصلية الحرارية ، k ، (ووحداتها سُعر سم^-١ °م^-١ ثانية^-١ ، أو وحدة حرارة بريطانية قدم^-١ درجة فهرنهيت^-١ ساعة^-١) مقسومة على سمك المادة . وعليه تساوي الموصلية الحرارية لمادة ما عدديا معامل انتقال الحرارة في صفيحة بسمك ١ سم . ولتحويل قيم الموصلية الحرارية المعطاة بوحدات نظام Cgs الى وحدات النظام الهندسي نضرب في القيمة ٢٩٠٫٥ .

ويزيد معدل انتقال الحرارة بزيادة المعامل الكلي لانتقال الحرارة وبالتالي يصغر حجم وحدة التقطير اللازم لتقطير كمية معينة من المياه . لهذا كانت معظم الأبحاث في مجال التقطير تهدف إلى زيادة معدل انتقال الحرارة .

وتتكون المقاومة الكلية لانتقال الحرارة في عمليات التقطير من عدة طبقات كما هو موضح في شكل (٥ – ٤) . وبغض النظر عن سرعة سريان الماء والبخار المغلي والبخار المتكثف ، فإنه توجد

* إذا كانت النسبة بين قطري الأنبوب الخارجي والداخلي أقل من ٢ ، فإن المتوسط الحسابي يكفي في هذه الحالة لحساب A مع ملاحظة أن المتوسط اللوغاريتمي صحيح نظرياً .



شكل (٥ – ٤)

سريان الحرارة عبر أنبوب المبخر . وتمثل طبقة بخار الماء المتكثف ومعدن الأنبوب المُقاوِمات لسريان الحرارة والتي يرمز لها في متن الكتاب بالرموز R_S ، R_M ، على التوالي . وتضاف مُقاوِمات طبقة الماء الملح والقشور معا ويرمز لها بالرمز R_W .

دائما طبقات ساكنة من هذه الموائع بالقرب من السطح المعدني للأنبوب ، هذا بالإضافة إلى وجود طبقة من القشور . ولإتمام عملية التقطير ، فإنه يلزم لحرارة التكثيف أن تمر خلال هذه الطبقات والتي تزيد مقاومتها بزيادة سمكها ، أما الموصلية الحرارية لهذه الطبقات فتختلف قيمها بشدة كما هو مبين في الجدول (٥ – ١) .

وتحسب المقاومة الكلية لسريان الحرارة R_O بإضافة المقاومات R_S و R_M و R_W في جهة بخار الماء المغلي وفي المعدن وفي جهة الماء ، على التوالي :

$$R_O = R_S + R_M + R_W$$

وتستخدم الكتابات السابقة في انتقال الحرارة عادة قِيَم مقلوب المقاومات والتي تعرف بمعاملات انتقال الحرارة h_O و h_S و h_M و h_W ، على الترتيب . وبالتالي تصبح المعادلة السابقة كمايلي :

$$\frac{1}{h_O} = \frac{1}{h_S} + \frac{1}{h_M} + \frac{1}{h_W}$$

جدول (٥ – ١)

الموصلية الحرارية لمواد مختلفة

المـــادة	درجة الحرارة (°م)	الموصلية الحرارية: سعر سم$^{-2}$ ثانية$^{-1}$ (°م/سم)$^{-1}$	الموصلية الحرارية: وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-2}$ ساعة$^{-1}$ (درجة فهرنهيت/بوصة)$^{-1}$
نحاس	١٨	٠ر٩٢	٢٦٧٠
	١٠٠	٠ر٩١	٢٦٤٠
ألومنيوم	١٠٠	٠ر٤٩	١٤٢٠
نيكل	١٨	٠ر١٤٢	٤١٣
	١٠٠	٠ر١٣٨	٤٠٠
صلب	١٠٠	٠ر١٠٧	٣١١
ماء	٤٠	٠ر٠٠١٥	٤ر٣٦
	٦٠	٠ر٠٠١٥٥	٤ر٥٠
بخار ماء	١٠٠	٠ر٠٠١٦٠	٤ر٦٥
	١٥٠	٠ر٠٠١٦٣	٤ر٧٤
كربونات الكالسيوم «رخام»	٢٥	٠ر٠٠٧١	٢٠ر٦٠
كبريتات الكالسيوم (اللامائية)	١٠٠	٠ر٠١٥	٤٣ر٦٠
طوب أكسيد المغنسيوم	٥٠ – ١١٣٠	٠ر٠٠٢٧ – ٠ر٠٠٧٢	٨ – ٢١

ومن المهم عمليا استخدام مقاومات سريان الحرارة R بدلا من معاملات انتقال الحرارة h ، إذ إن مجموع المقاومات للطبقات المختلفة يساوي المقاومة الكلية للسطح ، بينما لايعطي مجموع معاملات انتقال الحرارة للطبقات المختلفة معامل انتقال الحرارة الكلي .

وتعتمد الموصلية الحرارية للثلاث مواد الصلبة الأخيرة المدرجة في جدول (٥ – ١) على الشكل الدقيق لبنية الحبات grain structure وعليه تكون القيمة المعطاة بالجدول تقريبية . وبالرغم من كل هذه التحفظات ، إلا أن الموصلية الحرارية للمواد المكونة للطبقات على سطح انتقال الحرارة تقل بكثير جدا عنها للمعادن نفسها . فمثلا ، فإن طبقة من قشور كربونات الكالسيوم أو أكسيد المغنسيوم وبسمك صغير حوالي ٠١ر٠ مم ، تعطي مقاومة لسريان الحرارة في هذه الطبقة تزيد بكثير جدا عن مقاومة جدار أنبوب نحاسي بسمك جداري حوالي ١ مم ، إذ تقل الموصلية الحرارية للقشور عن جزء من الألف من قيمة الموصلية الحرارية للنحاس . وبالمثل يمكن القول إن طبقة من الماء الساكن بسمك جزء لكل ٦٠٠ جزء من سمك جدار أنبوب نحاسي ، تعطي مقاومةً لسريان الحرارة مساوية تقريبا لمقاومة جدار الأنبوب لسريان الحرارة . لذلك ، فإنه من المهم : (١) منع تكون القشور ، (٢) خفض سمك طبقات الماء الملح الساكن والبخار المتكثف .

ولقد كان من الممكن الحصول على معدلات عالية جدا لانتقال الحرارة لو لم تكن هناك أية طبقات ملامسة لجدار الأنبوب ويتم انتقال الحرارة في هذه الجدران فقط . فمثلا ، بفرق درجات حرارة قدره ١ درجة فهرنهيت لأنابيب بسمك جداري قدره ١ر٠ من البوصة من النحاس ، والنيكل ، والصلب ، فإن الحرارة المتنقلة لكل قدم مربع – ساعة هى على التوالي ٢٦٧٠٠ ، ٤١٣٠ ، و ٣١١٠ وحدة حرارة بريطانية . وتُمثل هذه المعدلات لانتقال الحرارة أقصى المعدلات النظرية التي يمكن الوصول إليها لمعادن بسمك ١ر٠ من البوصة . ولايُمكن عملياً أن تقل معاملات انتقال الحرارة عن ١٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-2}$ درجة فهرنهيت$^{-1}$ ساعة$^{-1}$ إلا إذا احتوى المُبخِّر على مميزات خاصة في التصميم لخفض سمك الطبقات اللامسة لأقل قيمة ممكنة لها . فمثلا ، وُجد أن قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي لمبخرات الأنابيب الرأسية الطولية والتي تحتوي على أنابيب من الصلب بقطر خارجي ٢ بوصة (٥ سم) ، وسمك جداري ١٠٩ر٠ بوصة (٢٧٥ر٠ سم) ، وبطول ٢٤ بوصة (٦٠ سم) ، تقدر بحوالي ١٥٠ وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-2}$ درجة فهرنهيت$^{-1}$ ساعة$^{-1}$ عند درجات حرارة منخفضة ، وترتفع هذه القيمة إلى ٥٠٠ عند درجات الحرارة المرتفعة وعندما يدخل ماء البحر من قاع الأنابيب ويرتفع إلى أعلى أثناء الغليان . وبدخول ماء البحر من أعلى الأنابيب وسريانه في طبقة رقيقة أمكن زيادة معامل انتقال الحرارة الكلي إلى ٧٥٠ كما أمكن زيادة معامل الحرارة الكلي إلى ٤٠٠٠* وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-2}$ درجة فهرنهيت$^{-1}$ ساعة$^{-1}$ بإضافة كميات ضئيلة من عوامل الإزباد frothing agents (مواد ذات فاعلية سطحية surfactants) إلى ماء البحر في التشغيل بالسريان العلوي . وتُستَرجع معظم عوامل الإزباد بالرش بالهواء . وعموما ، فإنه يُمكن تقليل سمك الطبقات الساكنة بزيادة كل من السرعة الخطية لماء البحر في اتجاه موازٍ لسطح

* ترجع هذه القيمة إلى أنابيب مزدوجة التخديد مصنوعة من سبيكة ٩٠ – ١٠ نيوكليت (زرنيخيد النيكل) .

انتقال الحرارة ، ودرجات حرارة الغليان ، وذلك لتشجيع الحمل مما يُحسِّن من انتقال الحرارة . (بالطبع هناك حدود لزيادة درجة الحرارة كنتيجة لزيادة القشور والتآكل أيضاً بارتفاع درجة الحرارة .) وهناك طريقة هامة لزيادة انتقال الحرارة وذلك باستبدال الأنابيب الاسطوانية الملساء بأنابيب محددة fluted tubes ، وتعطي هذه الأنابيب مساحة أكبر لانتقال الحرارة لكل قدم طولي من الأنبوب . كما تستخدم أيضا معززات الاضطراب turbulence داخل الأنابيب لزيادة معدل انتقال الحرارة للماء الملح الساري داخل الأنابيب .

ولقد ابتكرت واختبرت عدة وسائل لخفض سُمْك الطبقات الساكنة من الماء الملح وذلك بالحركة السريعة لكل ماء البحر المستخدم . ولقد أثبتت الخبرة أنه ، لمدى كبير نسبيا من السريان المضطرب ، يلزمنا زيادة سرعة السريان للماء بمقدار ٢٫٤ مثلًا تقريبا لمضاعفة مُعامل انتقال الحرارة في طبقة الماء . ويُمكن المحافظة على طبقة رقيقة من الماء في مبخرات مسح الطبقات الرقيقة wipe film evaporators وذلك بدوران مجموعة المساحات التي بداخل المبخر أثناء عملية الغليان . كما تساعد أيضاً طريقة مسح الطبقات الرقيقة على خفض تكوين القشور ، ولكن من الضروري استخدام تركيزات صغيرة من مواد تأخير تكون القشور scale-retarding additives . ويمكن أيضا الحصول على قيم مُعاملات انتقال حرارة أعلى من القيم السابقة وذلك باستخدام مبخرات هيكمان ذات الطرد المركزي Hickman's centrifugal evaporators والتي تستخدم في مقطرات الانضغاط compression stills . وفي هذا النوع من المبخرات ، يتبخر ماء البحر في حوض معدني يدور بسرعة بحيث ينشر ماء البحر بقوة الطرد المركزي . ولقد أمكن قياس معاملات انتقال حرارة بقيم تصل إلى ٤٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-٢}$ درجة فهرنهيت$^{-١}$ ساعة$^{-١}$ باستخدام هذه الأسطح .

ولخفض مقاومة انتقال الحرارة في جهة البخار من أسطح أنابيب المبخر ، فإنه من الضروري خفض سمك طبقة البخار المتكثف إلى أرق مايمكن . والقيمة المعتادة لمعامل انتقال الحرارة من جهة البخار تكون حوالي من ١٥٠٠ إلى ٢٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-٢}$ درجة فهرنهيت$^{-١}$ ساعة$^{-١}$. ولقد لوحظ أن وجود بعض عوامل منع البلل antiwetting agents ، مثل الزيوت وحمض الأولييك ، في علبة البخار يسبب التكثف المتقاطر dropwise condensation بدلا من تكثف الفيلم المستمر continuous film حيث تتحد القطرات معاً لتكوين قطرات أكبر ، ثم تجري هذه القطرات إلى أسفل الأنابيب إذا كانت رأسية . ولقد لوحظ أن التكثف المتقاطر يُزيد معدل انتقال الحرارة بالمقارنة بتكثف الفيلم المستمر . ولقد أمكن الحصول على معاملات انتقال حرارة حوالي ١٠٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-٢}$ درجة فهرنهيت$^{-١}$ ساعة$^{-١}$ لفترات طويلة في بعض المقطرات باستخدام إضافات additives للحصول على التكثف المتقاطر .

مصادر الحرارة

يلخص الجدول (٥ – ٢) حرارة الاحتراق لعدة أنواع مألوفة من الوقود ، والكميات المطلوبة منها لتبخير متر مكعب من الماء .

وتُمثل هذه الأرقام القيم الكلية ، أي أن الحرارة القصوى المطلقة التي يمكن لهذا الوقود إعطاؤها تحت ظروف مثالية للاحتراق . ومن المعتاد أن تقل هذه القيم بحوالي ٢٠٪ عمليا . والقيم المعطاة بالجدول لزيت الوقود ، وللفحم القاري ، ولخشب الصنوبر تُمثِّل قيماً متوسطة ، بينما تختلف القيم الحقيقية بمقدار ١٥٪ عن هذه القيم .

وتبلغ مقادير الوقود اللازمة لتبخير الماء حجماً كبيرا . فمثلا ، يلزم لتبخير كل ٢٠ طناً من الماء ما مقداره أكثر قليلا من طن واحد من زيت الوقود حتى مع الاستفادة الكاملة من حرارة احتراق الزيت . وبفرض أنه يجب تسخين الماء الملح إلى نقطة الغليان قبل عملية التبخير ، فإن جزءاً ملحوظاً من الحرارة اللازمة للتسخين – وليس كل الحرارة – يمكن الحصول عليه باسترجاع الحرارة من الماء الملح المطرود . وباعتبار أن كل الفقد يتم في الغلاية والمبخر والبخار المغلي والمضخات ، فإنه من الصعب تصميم مقطر أحادي التأثير يستخدم وقوداً أقل من ١٠٪ من وزن الماء العذب الناتج . (في المبخرات أحادية التأثير ، يتكثف البخار الناتج بدون الإفادة منه في غَلْي كميات إضافية من ماء البحر .) ولقد وجد أن كميات الوقود اللازمة للتبخير من سوائل الوقود الهيدروكربونية – مثل الكيروسين – تُماثِل كميات زيت الوقود ، ومن غير المتوقع أن يكون هناك أي وفر باستبدال زيت الوقود بهذه السوائل . أما إذا تم تسخين المقطر كهربائيا – ويعتبر ذلك مضيعة من وجهة نظر الطاقة المتاحة المفيدة لأنه يخفض من قيمة الطاقة الكهربائية بتحويلها إلى طاقة حرارية – فإن احتياجات الطاقة تُقدر بحوالي ٦٠٠ مثل قيمة الطاقة النظرية الصغرى اللازمة لاستعادة الماء النقي من ماء البحر بنسبة استعادة قدرها ٥٠٪ .

وبمعرفة هذه الاحتياجات الحرارية المرتفعة للتبخير ، فإنه من الضروري اقتصادياً الاستفادة من الحرارة الكامنة في البخار المتصاعد من ماء البحر المغلي لتقطير كميات إضافية من الماء الملح . وتستفيد أهم طرق التقطير – مثل التقطير المتعدد التأثيرات ، والتقطير الفجائي والتقطير بالانضغاط – بالفعل من هذه القاعدة .

ويستخدم التبخير أحادي المرحلة فقط عندما يلزم استخدام حجم صغير من وحدات التقطير أو عندما يتوفر بخار للتسخين بسهولة . وتستخدم المحطات البحرية هذه الطريقة لإنتاج الماء العذب بإنتاجية تصل إلى ٥٠ طناً من الماء العذب يومياً . ومن المألوف ، وجود مقطرات معملية أحادية التأثير تنتج مابين عدة عشرات من اللترات إلى عدة أطنان من الماء المقطر يومياً . وتعمل بعض

جدول (٥ - ٢)
حرارة الاحتراق لأنواع مختلفة من الوقود

الـــوقود	حرارة الاحتراق		كمية الوقود المطلوبة لتبخير متر مكعب من الماء عند ١٠٠°م
	كيلو سعر/كجم	وحدة حرارة بريطانية/رطل	
السوائل والمواد الصلبة			
زيت الوقود	١٠٦٠٠	١٩٠٠٠	٥١ كجم (١٤ جالون)
فحم قاري	٦٧٠٠	١٢٠٠٠	٨١ كجم
خشب (صنوبر أبيض ، ١٢٪ ماء)	٤٤٠٠	٧٩٠٠	١٢٣ كجم
غازي*			
هيدروجين	٣٣٩٠٠	٦١٠٠٠	٩ر١٥ كجم أو ٦٧٠٠ قدم مكعب
ميثان	١٣٣٠٠	٢٣٩٥٠	٦ر٤٠ كجم أو ٢١٥٠ قدم مكعب
بيوتان	١١٨٠٠	٢١٣٠٠	٦ر٤٥ كجم أو ٦٦٧ قدم مكعب
أول أكسيد الكربون	٢٤٣٠	٤٣٧٠	٢٢٢ كجم أو ٦٧٥٠ قدم مكعب
الحرارة المأخوذة من الطاقة الكهربية	٨٦٠ كيلو سعر لكل كيلووات ساعة	٣٤١٢ وحدة حرارة بريطانية لكل كيلووات ساعة	٦٢٥ كيلووات ساعة

* غاز رطب عند ١٥°م و ١ ضغط جوي .

الوحدات الكبيرة الأحادية التأثير عند ضغط منخفض ، إذ إن انخفاض درجة حرارة الغليان يقلل من مشاكل القشور . ويوضح الشكل (٥ – ٥) صورة لمقطر أُحادي التأثير .

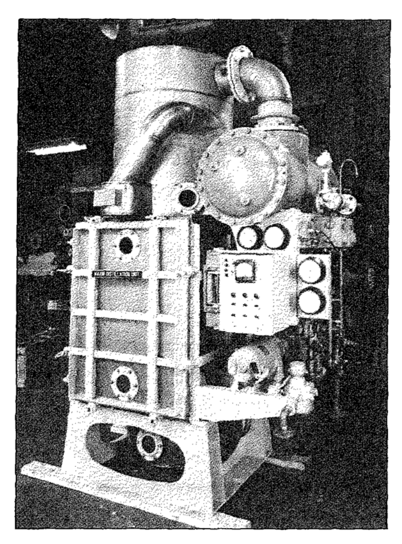
التقطير متعدد التأثيرات

الفكرة الأساسية

تقوم المقطرات المتعددة التأثيرات بالاستفادة من الأبخرة المتصاعدة من المبخر الأول للتكثف في المبخر الثاني . وعليه ، تُستخدم حرارة التكثف في غلي ماء البحر في المبخر الثاني ، وبالتالي فإن المبخر الثاني يعمل كمكثف للأبخرة القادمة من المبخر الأول ، وتصبح مهمة هذه الأبخرة في المبخر الثاني مثل مهمة بخار التسخين في المبخر الأول . وبالمثل ، فإن المبخر الثالث يعمل كمكثف للمبخر الثاني وهكذا . ويوضح شكل (٥ – ٦) هذه الفكرة (انظر أيضا شكل ٥ – ٩) . ويسمى كل مبخر في تلك السلسلة بالتأثير .

من الجلي ألا تتساوى درجات حرارة وضغوط الغليان في المبخرات المختلفة . وعلى سبيل المثال ، نعتبر عملية الغليان في المبخر الأول ، فحيث إن بخار التسخين عند ضغط ١ جوي فإنه يتكثف عند درجة حرارة ١٠٠ م . فإذا كان البخار في حَيِّز بخار المبخر الأول عند ضغط ١ جوي أيضا ، فإن درجة حرارة غليان ماء البحر المناظرة لهذا الضغط تصبح حوالي ١٠٠٫٥٣°م (شكل ٥ – ٣) ، ولايمكن لحرارة التكثيف الانتقال لماء البحر المغلي لكونه أعلى في درجة الحرارة من البخار المتكثف . وبناء على ذلك ، فإنه من الضروري المحافظة على ضغط منخفض في حيز بخار المبخر الأول حتى يمكن أخذ فرق درجات الحرارة في الاعتبار عند غليان كل من الماء النقي وماء البحر . وهذا فقط غير كاف ، لأنه للمحافظة على معدل معقول لسريان الحرارة خلال الأنابيب ، من البخار المتكثف إلى ماء البحر المغلي ، فإن درجة حرارة الماء المغلي يجب أن تقل بعدة درجات عنها للبخار المتكثف . فإذا كانت درجة حرارة غليان ماء البحر في المبخر الأول هى ٩٥ م فإن ضغط البخار في حيز المبخر الأول يجب أن يحفظ عند ٠٫٨٢ جوي كما هو مبين في شكل (٥ – ٣) . وعند هذا الضغط ، فإن الأبخرة سوف تتكثف في المبخر الثاني عند درجة حرارة حوالي ٩٠ م لتعطي فرقاً معقولًا في درجة الحرارة يسمح بانتقال الحرارة خلال جدران الأنابيب .

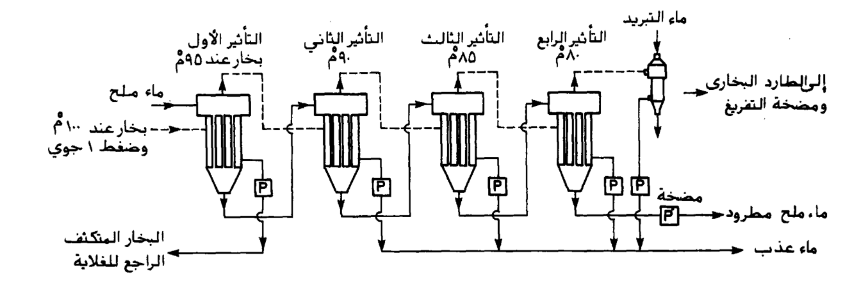
وتُستعمل المضخات P في شكل (٥ – ٦) للحصول على الماء العذب عند الضغط الجوي ، وذلك لأن الضغط في جميع المبخرات أقل من الضغط الجوي . كما يجب أيضاً عمل اللازم لنزع الهواء والغازات غير القابلة للتكثيف من حيز البخار في المبخرات . أما إذا سُمح لهذه الغازات بالتراكم ، فإن الضغط فوق السائل المغلي سوف يرتفع في الحال إلى القدر الكافي لإيقاف الغليان . لهذا السبب ، فإن حيز البخار في جميع المبخرات يلزم وصله بطارد بخاري **steam ejector** مع مضخة خلخلة . كما



شكل (٥ – ٥)

مبخر أحادي التأثير . بإذنٍ من قسم ماكسيم بشركة ايمهارت للتصنيع بمدينة هارت فورد بولاية كونيتيكت .

يمكن الاستعاضة عن هذا النظام بوصل كل حيز بخار بصمام خانق مناسب إلى حيز البخار للتأثير الذي يليه حيث يكون الضغط أقل ، ثم يوصل الحيز في التأثير الأخير فقط بطارد البخار ومضخة الخلخلة . وتُستخدم الطريقة الأخيرة في حالة ما إذا كانت كمية الهواء صغيرة ، وذلك لأن المفقود من البخار مع الهواء بهذه الطريقة يكون أقل منه في الطريقة الأولى . أما المضخة P في شكل (٥ –٦) فتُستخدم لسحب الماء الملح المطرود من المبخر الأخير لطرده إلى الجو المحيط عند الضغط الجوي .



شكل (٥ - ٦)

الفكرة الأساسية لمبخر رباعي التأثيرات (سريان الماء الملح لأسفل) .
الضغط ودرجة حرارة الغليان تقل من اليسار الى اليمين .

ولايوضح شكل (٥ – ٦) التحسينات العديدة الأخرى لترشيد استهلاك الحرارة في هذه الطريقة من التقطير والتي يمكن تطبيقها لتفيد الوحدات الكبيرة . ومن هذه التحسينات أن يُسخَّن ماء البحر الداخل للوحدة باستخدامه كمبرد للمكثف الأخير ، وبالاضافة إلى هذا يمكن الاستفادة من الحرارة المحسوسة للماء العذب والماء الملح المطرود لتسخين ماء البحر مبدئيا . أيضا يمكن دمج البخار المتكثف في الطارد البخاري – المستخدم للتفريغ الجزئي – مع الماء العذب الناتج . كما يمكن استبدال السريان الموازي لماء البحر والبخار (من اليسار لليمين كما في شكل ٥ – ٦) بسريان عكسي أي أن يدخل ماء البحر المبخر الأخير أولا ، وفي هذه الحالة فإنه يلزم استخدام مضخات إضافية لدفع الماء الملح بين المبخرات .

ولقد أصبح من الممكن ، بعد الإستفادة من التأثيرات المتعددة ، أن يُنتَج طنٌّ واحدٌ من بخار التسخين كميةَ ماءٍ مقطرٍ تزيد عن الطن . وفي الحقيقة ، فإن كمية الماء العذب الناتج لكل وحدة من بخار التسخين تزيد طرديا مع زيادة عدد التأثيرات . ولقد بينت الخبرة في كثير من المنشآت أن كمية الماء العذب المنتج بالطن لكل طن من بخار التسخين في وحدات ذات مبخر ، ومبخرين ، وثلاثة مبخرات ، وأربعة مبخرات ، وخمسة مبخرات هى على التوالي : ٩ر٠ و ٧٥ر١ و ٥ر٢ و ٢ ر٣ و ٠ر٤ .

ومن الواضح أنه كلما زاد عدد التأثيرات كلما قلت احتياجات بخار التسخين لكل طن من الماء العذب الناتج (القطارة) بينما تؤدي زيادة عدد التأثيرات إلى زيادة قيمة رأس المال المطلوب . وكما هو متبع في كثير من العمليات الصناعية الأخرى ، فإن العلاقة بين تكاليف التشغيل وتكاليف رأس المال تُعطي الحجم الأمثل لمحطة التقطير .

عدد التأثيرات الأمثل

كمبدأ ، فإنه يمكن أخذ أي عدد من التأثيرات . وبالرغم من أن درجة حرارة تكثيف بخار التسخين يجب أن تزيد قليلا عن درجة حرارة غليان ماء البحر ، إلا أن الارتفاع في درجة الغليان ΔT_B (أي فرق درجة الحرارة بين ماء البحر المغلي والماء العذب على التوالي ، عند ضغط ثابت كما هو مبين في شكل ٥ – ٣) صغير نسبيا ولايضع حداً خطيراً لعدد التأثيرات . فمثلا ، بأخذ مقطر يعمل مابين درجات حرارة ١٠٠ م و ٢٧ م في التأثيرين الأول والأخير على التوالي ، حيث يقوم المقطر بتركيز ماء البحر العادي إلى الضعف ، فإن ΔT_B تمثل حوالى ٧ر٠ °م في المتوسط لكل تأثير . وبناء على ذلك ، فإن المحطة المثالية متعددة التأثيرات يمكن أن تحتوي على أكثر من ١٠٠ تأثير . ولكن من الضروري عملياً المحافظة على فرق في درجة الحرارة أكبر نسبيا من ٧ر٠ °م بين أسطح انتقال الحرارة حتى يمكن للحرارة أن تسري بمعدل مناسب .

أما العوامل الأساسية لحساب تكاليف محطة ذات إنتاجية معينة من الماء العذب فهي : (١) التكاليف الثابتة ، وهى أرباح رأس المال المستثمر والضرائب وقيمة استهلاك رأس المال والصيانة ، وجميع هذه التكاليف تتناسب مع عدد التأثيرات ، (٢) التكلفة اليومية لبخار التسخين والتي تتناسب بالتقريب عكسيا مع عدد التأثيرات المستخدم . وبناء على ذلك ، فإن التكلفة C لكل وحدة ماء منتج يمكن التعبير عنها بمعادلة لها الصيغة التالية :

$$C = An + \frac{S}{n}$$

حيث تمثل A التكاليف الثابتة لكل تأثير لكل وحدة ماء منتج ، وتمثل S تكاليف بخار التسخين لكل وحدة ماء منتج في مبخر أحادي التأثير ، وتمثل n عدد التأثيرات .

وبتفاضل C بالنسبة إلى n ومساواة الناتج بالصفر ، فإن العدد الأمثل للتأثيرات يصبح

$$n_{\text{opt}} = \sqrt{S/A}$$

وبناء على ذلك ، فإن الرقم الصحيح القريب إلى $\sqrt{S/A}$ سوف يمثل العدد الأمثل للتأثيرات . وهذه الحسابات تقريبية ، إذ أهملت تكاليف المكثف ، والطارد البخاري ، ومضخات التفريغ بالإضافة إلى تكاليف العمالة التقليدية . ولاتزيد تكاليف العمالة كثيراً مع زيادة حجم المحطة نظرا لأن هذه المحطات تعمل تلقائيا في معظمها ، أي أن نصيب تكلفة العمالة في تكلفة وحدة الماء الناتج تقل بشكل محسوس بزيادة حجم المحطة .

ولقد أُنشىء عدد معقول من المحطات الكبيرة المتعددة التأثيرات في مناطق مختلفة . وكان عدد التأثيرات الغالب على هذه المحطات ستة أو أقل . وانخفاض نسبة تكاليف الوقود إلى تكاليف رأس المال يرجع جزئيا إلى انخفاض تكلفة الوقود في بعض من هذه المناطق وكذلك إلى ارتفاع تكاليف مواد البناء . ويجب أن تُصنع أنابيب التسخين من النحاس ، أو النيكل ، أو النحاس الأصفر المقوي أو أية سبائك أخرى جيدة التوصيل الحراري ومقاومة للتآكل . وبالرغم من أن كل هذه المواد باهظة التكاليف ، وبالرغم من غلاء الثمن النسبي للتيتانيوم ، إلا أنه مقاوم رائع للتآكل مما أهله للاستعمال بدلًا من سبائك النحاس في بعض المحطات .

وتضاف كميات صغيرة من حمض الكبريتيك من آن إلى آخر إلى التغذية (مياه البحر) لخفض الأس الهيدروجيني ولمنع ترسيب القشور . وهذه الطريقة تُزيد خاصية إحداث التآكل للتغذية مما يجعلها غير مثالية للاستعمال المستمر . كما أن هذه الطريقة فعالة مع كربونات الكالسيوم

وهيدروكسيد المغنسيوم ولكنها عديمة الجدوى مع قشور كبريتات الكالسيوم والتي تظهر فقط عند درجات الحرارة العالية . أما إضافة عديد الفوسفات polyphosphates إلى ماء البحر – برغم كونه أكثر تكلفة – فيمنع ترسيب كبريتات الكالسيوم ولايزيد خواص إحداث التآكل لماء البحر الخام ، ويُعطي البوليفوسفات أفضل النتائج عندما يستخدم عند درجة حرارة أقل من ٨٢ م .

التقطير الفجائي

الفكرة الأساسية

كما أوضحنا في الأجزاء السابقة لعمليات التقطير ، فإن تسخين الماء الملح وغليانه يتم في نفس الوعاء . ويُمكن تكوُّن بعض القشور في ماء البحر أثناء تسخينه وقبلما يحدث أي تبخير محسوس ، ولكن معظم القشور تتكون أثناء التبخير التام . أما في عملية التبخير الفجائي ، فإن ماء البحر يُسخَّن أولًا داخل أنابيب ثم يُبخَّر في غرف ذات ضغط أقل من الضغط داخل أنابيب التسخين . وحيث إن البخار يصعد من السائل الساخن ، فإن الرواسب تنتج أساسا في السائل .

ولأول وهلة فقد تبدو عملية التقطير الفجائي غير فعالة إذ يبرد الماء الساخن بشكل ملحوظ عندما تتبخر كمية صغيرة منه فقط . فعلى سبيل المثال ، يسبب تبخير ١ر٧٪ من كمية الماء مبدئيا عند درجة ١٠٠ م تبريد الماء إلى درجة ٦٠ م . ولكن المميزات الناتجة من تقليل مشاكل القشور بالإضافة إلى سهولة تصميم المبخرات الفجائية جعلت من هذه الطريقة منافساً قويا للمبخرات المتعددة التأثيرات ، هذا بالإضافة إلى كونها أقل تكلفة من المبخرات المتعددة التأثيرات في المحطات الكبيرة .

ويلاحظ أن معظم مقطرات ماء البحر في منطقة الخليج العربي تتكون من مقطرات فجائية . وتستخدم الكويت – والتي تمتلك أكبر محطة لإزالة الملوحة في عام ١٩٧٤ (حوالي ٢٤٠٠٠٠ طن يوميا = ٦٥ مليون جالون يوميا ويجري حاليا تركيب وحدة بطاقة ٦٥٠٠٠ طن يوميا) – في الغالب محطات من نوع التقطير الفجائي . وهناك محاولة لتشغيل أكبر محطة في العالم من وحدة واحدة من التبخير الفجائي في هونج كونج بطاقة إنتاجية حوالي ٢٠٠٠٠٠ طن يوميا .

ويُوضح شكل (٥ – ٧) الفكرة الأساسية لعملية التقطير الفجائي ، كما يبين الشكل مميزات استعمال التبخير الفجائي في عدة مراحل . ويدخل الماء الملح إلى مجموعة الأنابيب الموجودة في حيِّز البخار لغرفة البخر الفجائي حيث يتم تسخينه مبدئيا . ويمرر الماء بعد ذلك إلى سخان يتكوّن من مجموعة من الأنابيب التي تسخن خارجيا ببخار مما يرفع درجة حرارة الماء الملح إلى ١٠٠ م ولكن بدون غليان نتيجة لإبقاء الضغط أعلى من ١ جوي . حينئذ ، يدخل ماء البحر الساخن إلى غرفة

تبخير فجائي لها ضغط أقل . ولذلك يتبخر جزء من الماء ، ويتكثف البخار الناتج على الأنابيب الناقلة للماء البارد إلى السخان . ويتم بعد ذلك تخزين كل من الماء العذب الناتج (القطارة) والماء الملح عند الضغط الجوي باستخدام مضخات . وتؤثر أنابيب التبادل الحراري* بين البخار المتكثف وماء البحر الوارد بشدة في اقتصاديات هذه العملية .

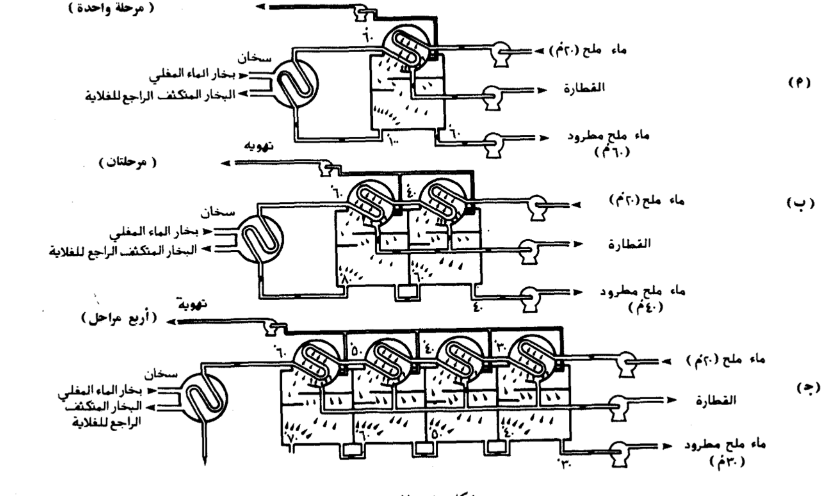
وتعتمد درجة حرارة الماء الملح ، عند الخروج من غرفة التبخير الفجائي على كمية البخر الناتجة عنها . فإذا كان المطلوب إنتاج مايعادل ١ر٧٪ بخار من كمية الماء الملح فإنه يلزم تبريد الماء الملح إلى درجة حرارة ٦٠ م في غرفة التبخير الفجائي . وبناء على ذلك ، فإن ضغط البخار السائد في غرفة التبخير الفجائي يساوي الضغط المناظر لماء البحر عند درجة ٦٠ م (شكل ٥ - ٣) . أما البخار الناتج ، والذي يصل إلى أنابيب نقل ماء البحر البارد ، فسوف يتكثف عند درجة ٦٠ م أيضا . وعليه ، تكون أعلى درجة حرارة يمكن تسخين ماء البحر إليها في غرفة التبخير الفجائي أقل قليلا من ٦٠ م أما باقي التسخين لدرجة ١٠٠ م فلابد أن يتم في السخان .

وكما أوضحنا سابقا ، فإن احتياج الطاقة لمبخر فجائي أحادي المرحلة تساوي بالتقريب احتياج الطاقة لمبخر عادي أحادي التأثير له نفس معدل الإنتاج ، إذ تتساوى كمية حرارة التبخير في غرفة التبخير الفجائي الأحادية مع حرارة تكثيف بخار التسخين . وبمعنى آخر ، فإن وزن التكثيف الناتج من غرفة التبخير الفجائي يساوي تقريبا وزن بخار التسخين المتكثف .

ومن الممكن بالطبع إنتاج قُطَارة distillate من كل وحدة من بخار التسخين إذا تم البخر الفجائي في أكثر من مرحلة واحدة . ففي شكل (٥ - ٧ ب) تنتج وحدة التقطير الفجائي ثنائية المراحل نفس الناتج مثل وحدة التقطير أحادية المرحلة كما هو موضح بالرسم ، وذلك عندما تكون درجة حرارة تبخير الماء الملح في المبخرين ٦٠ و ٤٠ م على التوالي ، كما ترفع درجة حرارة الماء الملح الداخل بحوالي ٢٠°م في كل مرحلة . وتمثل كمية الماء المتبخر في كل مرحلة مايعادل نصف الكمية المنتجة في وحدة أحادية المرحلة . أما الماء الملح المطرود فله درجة حرارة ٤٠ م بدلا من ٦٠ م كما كان سابقا . وعليه ، فإن كمية الحرارة المفقودة في الماء الملح المطرود تصبح أقل . وينتج عن هذا إضافة كمية أقل من الحرارة إلى السخان حيث ترتفع درجة حرارة الماء الملح من ٦٠ إلى ٨٠ م ، وليس إلى ١٠٠°م كما هو الحال في الوحدة أحادية المرحلة . وبناء على ذلك ، تصبح كمية بخار التسخين نصف الكمية اللازمة للوحدة أحادية المرحلة فقط .

---

* يستخدم لفظ التبادل الحراري ليدل على سريان الحرارة من درجة حرارة عالية إلى أخرى منخفضة ، ولا يعنى معنى الأخذ والعطاء للحرارة كما نوقش في الفصل الثامن .



شكل (٥ - ٧)
الفكرة الأساسية للتبخير الفجائي متعدد المراحل

وأخيراً ، باعتبار الوحدة رباعية المراحل (شكل ٥ - ٧ جـ) ، فإن عملية البخر الفجائي تتم في أربع مراحل ، مما يخفض درجة حرارة الماء الملح المتبخر ويزيد درجة حرارة الماء الملح الوارد بحوالي ١٠°م لكل منها . وفي هذه الحالة ، فإن الماء الملح يُطرد عند درجة ٣٠ م بينما تصبح كمية بخار التسخين المطلوبة حوالي ربع قيمتها في حالة وحدة أحادية المرحلة ، وذلك نتيجة رفع درجة حرارة الماء الملح بمقدار ١٠°م في السخان .

ولقد حسبت جميع درجات الحرارة الموضحة في شكل (٥ - ٧) بطريقة تقريبية ، وذلك لأن أهمية الأرقام هنا توضيح تحسين الجدوى الاقتصادية بزيادة عدد المراحل . أما عملياً ، فلا يمكن أن تنقل الحرارة بنفس الكفاءة التي افترضت . وعليه ، فإن الماء الملح في الأنابيب يخرج من كل مرحلة أبرد من البخار الناتج المتكثف . وفي الواقع ، فإن مُعامل انتقال الحرارة الكلي يقل عموما عن قيمته في المبخرات متعددة التأثيرات نتيجة لعدم غليان الماء الملح داخل أنابيب المبخر الفجائي . ولاينقص استهلاك الحرارة عمليا للمبخر الفجائي بمعدل سريع مع زيادة عدد المراحل كما هو موضح في الشكل البسيط (٥ - ٧) ، أو كما هو الحال في المقطرات متعددة التأثيرات . ولكن هناك ميزّة إمكانية إضافة أكثر من مرحلة إلى مبخر فجائي وبدون استعمال أغلفة منفصلة لكل مرحلة مما يقلل التكاليف ، ولايتوفر هذا للمبخرات متعددة التأثيرات المعتادة .

الاقتصاد الحراري

تحوي المحطات العملية عدداً من الصفات الإضافية التي تعمل على تحسين استهلاك الحرارة وخفض تكوين القشور والتآكل .

تعالج التغذية بحوالي ٥ أجزاء لكل مليون ، من مادة الـ «هاجفاب إل بي Hagevap LP» - وهى تركيبة من عديد الفوسفات وسلفونات اللجنين lignin sulfonate (شركة كالجون بمدينة بتسبرج بولاية بنسلفانيا .Calgon Corp., Pittsburgh, Penn) - أو أي مُنتج مماثل لتشجيع تكوين حمأة لينة من كربونات الكالسيوم بدلًا من القشور الملتصقة . ويمكن تقليل التآكل بتمرير مياه التغذية خلال نازع الهواء deaerator قبل دخوله إلى السخان . ويتم في نازع الهواء التخلص من جزء كبير من الهواء ومن ثاني أكسيد الكربون الموجودين بالماء بينما تترسب الحمأة .

ويتم سحب الهواء والغازات الأخرى غير القابلة للتكثيف باستمرار ، من خلال نظام خاص للمحافظة على الضغوط في المراحل المختلفة عند مستواها المحدد .

وحيث إن جزءاً رئيساً من تكلفة رأس المال يتمثل في مادة الأنابيب ، فإنه من المعتاد تقدير تكاليف التبخير الفجائي بدلالة مقدار مساحة انتقال الحرارة . وبزيادة عدد المراحل مع المحافظة على

نسبة الأداء performance ratio ثابتة – أي وزن الماء الناتج إلى وزن بخار التسخين – تقل المساحة المطلوبة للتبادل الحراري . وتعطي ٢٤ مرحلة نسبة أداء* حوالي ٨ في العادة . وبمقارنة المنشآت ذات العدد الكبير من المراحل والتي لها نفس الناتج اليومي ، فإنه يمكن إثبات أن نسبة الأداء تتناسب عكسيا مع مساحة انتقال الحرارة في المنشأة . وهذا يعني – مرة أخرى – تناسبا عكسيا بين تكاليف التشغيل وتكاليف رأس المال .

أما أنابيب انتقال الحرارة فيمكن ترتيبها رأسيا أو أفقيا . ولكل من هاتين الحالتين مميزاته الخاصة ، ولكن يُفضَّل الأخير للوحدات كبيرة الإنتاجية . ويوضح شكل (٥ – ٨) الفكرة الأساسية في تصميم مبخر فجائي أفقي الأنابيب مكوناً من ٢٠ مرحلة مرتبة في صفين ويشطر كل صف بفاصل طولي رأسي مع وجود خمس غرف تبخير فجائي على كل جانب لهذا الفاصل في كل صف مما يجعل تصميم هذه المقطرات صغير الحجم جدا .

ومن حيث الفكرة الأساسية ، فإنه يمكن تشغيل المبخرات الفجائية على مدى واسع من الضغوط ودرجات الحرارة ، ولكن عملياً لاتزيد درجة حرارة الماء الملح الخارج من السخان عن ١٠٠ م . وعليه ، يجب دائما الحفاظ على ضغوط منخفضة في غرف التبخير الفجائي . أما أسباب التشغيل عند درجات حرارة منخفضة نسبيا لعملية البخر فيه : (١) الرغبة في استخدام بخار تسخين ذي ضغط منخفض ، (٢) منع ترسيب القشور في أنابيب الماء الملح . وتطبق هذه الاعتبارات أيضا على المبخرات متعددة التأثيرات والتي قُدمت في الجزء السابق ، مثل المبخرات ذات الأنابيب الطويلة الرأسية .

ويعتبر بخار التسخين عند ضغوط تتراوح مابين ١ر٠ و ٥ر١ ضغط جوي من الأبخرة ذات الضغط المنخفض في الاستعمالات الصناعية . أما درجة حرارة التكثيف المناظرة لهذه الضغوط فهي على التوالي ١٠٠ و ١١٢ م وهي كافية لتشغيل سخان المبخر الفجائي أو لتشغيل التأثير الأول للمقطر متعدد التأثيرات . وفي العادة ، يتوفر هذا النوع من البخار بتكاليف زهيدة من المحطات الكيميائية . كما يمكن أيضاً ربط محطات توليد الكهرباء التجارية التي تستعمل وقوداً أحفورياً fossil fuel أو وقوداً نووياً nuclear fuel في محطات التقطير . كما أُقتُرِحَ أيضا استخدام بخار تسخين من مفاعل نووي ذي درجة حرارة منخفضة وأجريت دراسة اقتصادية لذلك . ويُمكن بناء المفاعلات النووية ذات درجة الحرارة المنخفضة بتكاليف تقل عنها للمفاعلات ذات الضغط العالي .

---

* تعرف نسبة الأداء بأنها عدد أرطال الماء العذب الناتج لكل ١٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية متبادلة في السخان (شكل ٥ – ٧) . وحيث إن حرارة تبخير الماء حوالي ١٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية لكل رطل تقريبا ، فإن نسبة التشغيل تعادل تقريبا كمية الناتج (بالوزن) لكل كمية بخار (بالوزن) تستعمل للتسخين في السخان .

شكل (٥ - ٨)

مبخر فجائي أفقي . عن فرانكل (١٩٦٠) ، «Frankel, 1960»

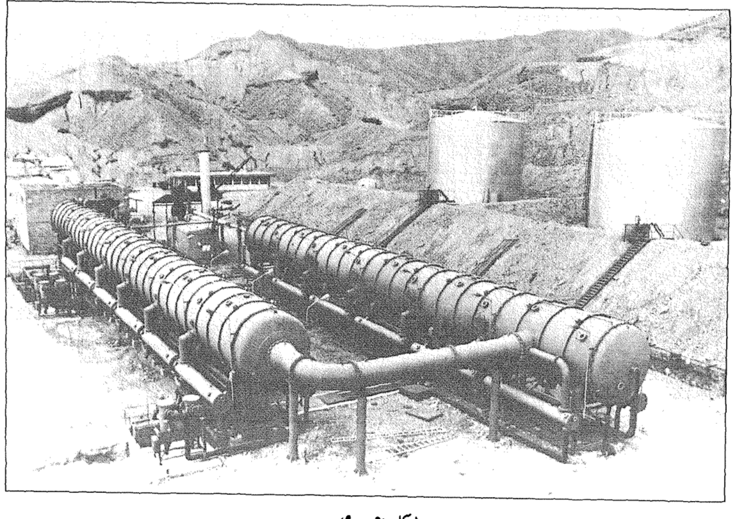
عملية إعادة تسخين البخار

يجب أن تكون أسطح تبادل الحرارة كبيرة في المبخرات الفجائية التقليدية إذا ما قلَّ الفرق في درجة الحرارة بين البخار المتكثف وماء البحر . ونتيجة لارتفاع تكاليف هذه الأنابيب ، فلقد كانت هناك محاولات لتعديل عملية البخر الفجائي بغرض تقليل المساحة المطلوبة لأسطح التبادل الحراري .

أما في عملية إعادة تسخين البخار للتبخير الفجائي ، والتي تسمى أيضا عملية التقطير بالتلامس المباشر direct contact distillation process والموضحة في شكل (٥ - ١٠) ، فإن الأبخرة الموجودة بغرف التبخير الفجائي تتكثف على رشاش أو طبقة رقيقة من الماء المقطر البارد . ويتم تلامس مباشر بين الأبخرة وطبقة الماء الرقيقة وبدون أي أسطح معدنية للفصل بينهما ، وبدون السماح للماء المقطر والماء الملح في غرفة التبخير الفجائي بالاختلاط . وكنتيجة لتكثيف البخار ، ترتفع درجة حرارة الماء المقطر . ويُضخ الماء المقطر من كل مرحلة إلى المرحلة المجاورة والتي تعمل عند درجة حرارة أعلى وضغط أعلى . ويزيد حجم غرفة التبخير الفجائي باستمرار كلما حدث التكثيف ليصل إلى أكبر حجم له عند الغرفة الأولى . ويمكن الآن للماء المقطر الساخن أن يمر خلال مبادل حراري لسائلين في اتجاه سريان معاكس (يسمى هذا المبادل الحراري بمبرد الماء الناتج) حيث أولا تنتقل الحرارة المكتسبة بالمرور داخل غرفة التبخير الفجائي إلى زيت غير قابل للمزج ، ثم أخيراً تنتقل الحرارة إلى ماء البحر البارد في مبادل آخر (يسمى سخان الماء الملح) . وتتم عمليات انتقال الحرارة هذه بالتلامس المباشر أيضا وبدون أسطح معدنية . ويرتفع الزيت الخفيف في المبادلات الحرارية من خلال الماء الذي يسري لأسفل . وتُسحب كمية من الماء الناتج تعادل كميات الأبخرة الناتجة بالبخر الفجائي والمتكثفة في كل المراحل . وتتم الاستفادة من دوران الفرق بين الماء المبرد والماء الناتج مرة أخرى بإعادته الى غرفة البخر الفجائي ليعمل كوسط تكثيف للبخار . وتُضاف حرارة إلى النظام في الجزء المكتوب عليه : حرارة التعويض أو حرارة إضافية لإمداد العملية بالحرارة الضرورية ، بالإضافة إلى تعويض الفقد . ويُمكن استعمال المبادلات الحرارية التقليدية بدلًا من الوحدات التي تستخدم نوع الزيت غير القابل للامتزاج .

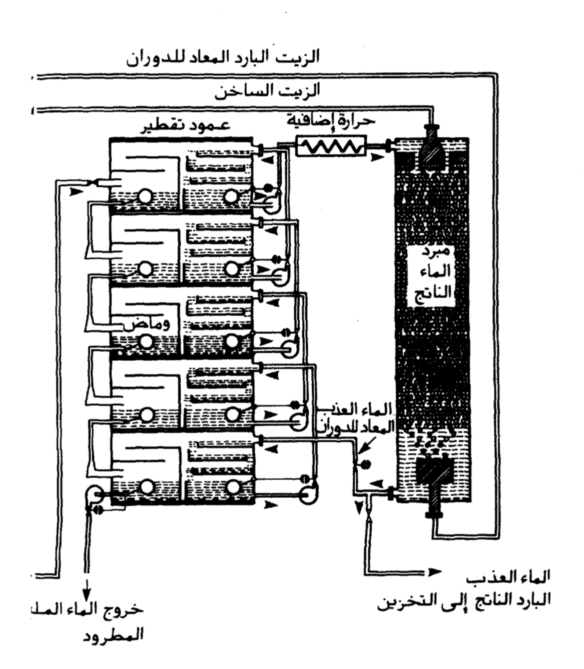
وكما أوضحنا ، فإن هذه العملية تشبه إلى حد كبير الطريقة المعتادة للتقطير الفجائي فيما عدا أن الماء المقطر يعمل كمبرد مباشر للبخار بدلا من أنابيب تحمل الماء الملح البارد . أما الحرارة المتجمعة بالماء المقطر فتنتقل إلى ماء البحر في جهاز منفصل لنقل الحرارة وبدون الحاجة إلى أسطح معدنية لنقل الحرارة .

ولقد اقتُرحت عدة أشكال متنوعة لهذه الطريقة . بعض هذه الأشكال يَستخدم فرشاً صلباً من الصخور لتخزين الحرارة ولتبريد الماء العذب بدلًا من استخدام الزيت كوسط لتكثيف البخار .



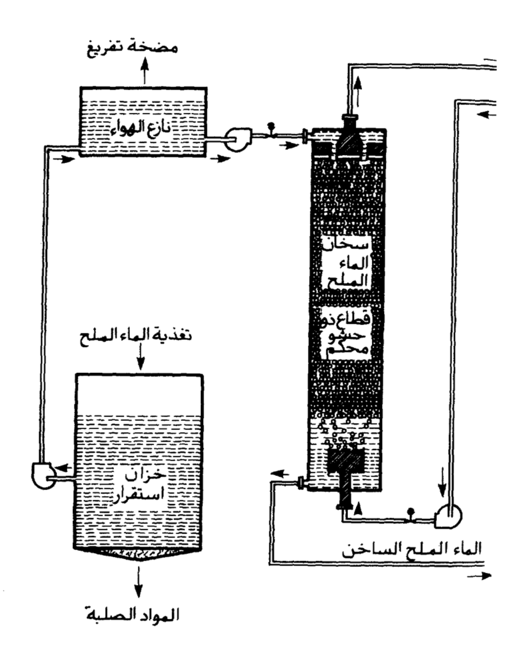
شكل (٥ – ٩)

محطة تقطير أفقية الأنابيب ومتعددة التأثيرات . سعة الإنتاج ٤٠٠٠ طن يومياً (حوالي مليون جالون يومياً) . الصورة باذن من شركة هندسة إزالة ملوحة المياه ، فلسطين المحتلة .



شكل (٥ – ١٠)

الفكرة الأساسية لعملية إعادة تسخين البخار والتبخير الفجائي . ويعالج الماء الملح بالاستقرار والتهوية ، ثم يُسخن بتيار معاكس من الزيت الساخن بالتلامس المباشر في مبادل حراري من نوع سائل إلى سائل . (انظر بقية الرسم في الصفحة المقابلة) .



شكل (٥ – ١٠) . . . يتبع ماسبق

ويُجمع البخار مع سريان الماء العذب المعاد للدوران . تنتقل الحرارة من الماء العذب الساخن إلى الزيت بالتلامس المباشر في مبادل حراري ثانٍ . وتنتقل الحرارة اللازمة لاستمرار العملية إلى سريان الماء العذب . (بإذن من شركة ف . م. س. سانتا بربرا بكاليفورنيا) .

وتعتبر عملية إعادة تسخين البخار عملية هامة نظراً لاستخدامها مدخلًا غير تقليدي لمشاكل انتقال الحرارة في التقطير . ولم يثبت حتى الآن ما إذا كانت هذه الطريقة أجدى اقتصاديا من الطريقة المعتادة للتبخير الفجائي التي شرحت فيما سبق أم لا .

التقطير بانضغاط البخار

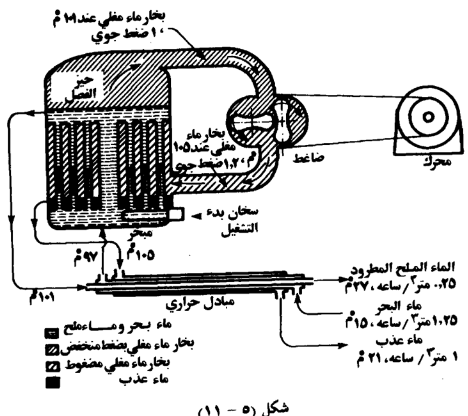
الفكرة الأساسية

بينما تَستخدم وحدات التقطير متعدد التأثيرات والتبخير الفجائي مصدرَ بخارٍ خارجيٍّ للتسخين كمصدر أساسي للحرارة ، فإن التقطير بانضغاط البخار – والذي يُختصر عادة إلى التقطير بالانضغاط – يَستخدم بخاره الخاص كمصدر حراري بعدما يُضغط هذا البخار . وفي هذه الطريقة ، يمكن الحصول على اقتصادية عالية للطاقة . ولكن ، من الضروري الحصول على الطاقة الميكانيكية باستخدام ضاغط (أو أي شكل للطاقة المستفادة بأجهزة أخرى مثل ضاغط الطارد البخاري steam-ejector compressor) . وبرغم اختلاف هذه العملية للتقطير عن العملية المثالية الموضحة في شكل (٣ – ١) ، فإنه يلزم التنويه بأن قدرة التشغيل اللازمة لعملية إزالة الملوحة هنا يتم الحصول عليها من ضاغط وليس من مصادر حرارية كما هو الحال في عمليات التقطير الأخرى والتي نوقشت في الفصل الحالي .

وكما هو موضح بالرسم التخطيطي في الشكل (٥ – ١١) ، يسخن ماء البحر مبدئيا في مبادل حراري أنبوبي مستخدما كلًا من الماء الملح المطرود والماء العذب الخارجين من الوحدة ، ثم يُغلي ماء البحر داخل أنابيب المقطر . وتُضغط الأبخرة ، ثم ترجع إلى المقطر حيث تتكثف خارج الأنابيب مما يوفر الحرارة اللازمة لعملية الغليان . وتسحب الغازات غير القابلة للتكثيف من حيز البخار والتكثيف بوساطة مضخة سحب أو طارد بخارى أيهما يلائم .

ويُعتبر الضاغط هو قلب وحدة التقطير . فإذا لم تضغط الأبخرة فإنه لايمكنها التكثف على الأنابيب الحاملة لماء البحر المغلي لأن درجة حرارة تكثيف البخار النقي عند ضغط معين تقل عن درجة حرارة غليان الماء الملح عند هذا الضغط . فمثلا ، إذا كان ضغط البخار ١ ضغط جوي ، فإن بخار الماء يتكثف عند درجة ١٠٠ م ، ولكن ماء البحر بتركيز مضاعف يغلي عند حوالي ١٠١°م . وحتى يتسنى للأبخرة التكثف عند درجة حرارة ١٠١ م ، فإنه يلزم على الأقل لهذه الأبخرة أن تضغط إلى ضغط ١٫٠٣ ضغط جوي .

كما أوضحنا ، يُعتبر الضاغط هو مصدر طاقة هذه العملية . ويكون هذا الضاغط عادة من النوع ذي الإزاحة المباشرة ويُدار بمكنة أو بمحرك كهربائي . كما يمكن استخدام طوارد بخارية



شكل (٥ — ١١)

الفكرة الأساسية لمقطر انضغاط . عن لاثام «Latham» (١٩٤٦) .

كضواغط للأبخرة ، ولكن إذا كانت الوحدة صغيرة ، فإنه تُفضل الطاقة الميكانيكية فيما عدا جزء صغير من الحرارة يلزم لإسراع بداية التشغيل . ويجب أن يُراعي عند حساب القدرة المطلوبة أن درجة حرارة الأبخرة ترتفع بضغطها ، ففي الواقع لوضُغِطَت أبخرة الماء في وعاء تام العزل (أي انضغاط أدياباتي) فإن ارتفاع درجة الحرارة يزيد حتى يتعدى الزيادة في درجة التكثيف نتيجة ارتفاع الضغط . أو بمعنى آخر ، يصبح البخار أسخن من أن يكثف* . وبسبب وجود أنابيب التبريد الحاملة للماء الملح المغلي عند درجة حرارة ثابتة ، تكثيف البخار المضغوط في حيز البخار لمقطر الانضغاط .

ويُعبَّر عن الشغل W_c اللازم لضغط طن واحد من البخار المحمي **superheated** عند درجة

---

* على العكس ، إذا تمدد بخار ماء غير مشبع تمدداً أدياباتياً ، فإن تأثير التبريد يكفي لتكثيف البخار بالرغم من انخفاض الضغط . ومثال على ذلك غرف ويلسن للسُحُب **Wilson cloud chamber** المستخدمة لدراسة الإشعاع عالي الطاقة **high-energy radiation** .

حرارة ١٠١ م وعند ضغط ١ جوي إلى ضغط r ضغط جوي بالمعادلة الآتية :

$$W_c = 24.0 \times \frac{r^2 - 1}{r}$$

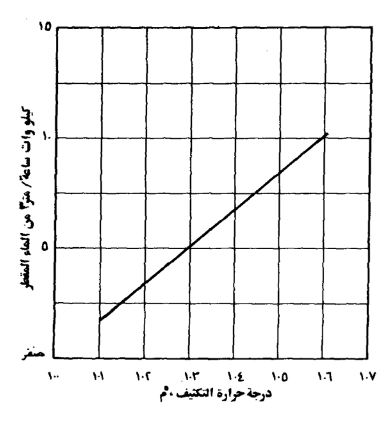
حيث W_c بوحدات كيلو وات ساعة/متر مكعب من الماء العذب . ويوجد إثبات المعادلة السابقة في ملحق ٣ ا الذي يحوي أيضا معادلة أكثر تعقيدا تطبق لدرجات الحرارة والضغط الاخرى للبخار المحمي . ويوضح شكل (٥ - ١٢) العلاقة بين W_c ودرجة حرارة التكثيف المناظر لقيمة r ، أي درجة حرارة الماء العذب المتكثف في صندوق البخار . ويجب أن تزيد درجة الحرارة هذه عن درجة حرارة غليان الماء الملح الذي له ضعف التركيز والساري في الأنابيب عند درجة ١٠١ م تقريبا .

كما بينا ، فإن احتياجات الشغل تزيد بزيادة درجة حرارة التكثيف . وللتقليل من احتياجات القدرة ، فإنه يُفضل التشغيل عند أقل درجة حرارة تكثيف ممكنة ، ولكن هذا يقلل من معدل انتقال الحرارة خلال الأنابيب وبالتالي يُزيد من عدد الأنابيب المطلوبة . وبالطبع ، فإنه يلزم التوازن بين تكاليف التشغيل وتكاليف رأس المال لتحديد الظروف المثلى لتصميم المحطة . وكان نتيجة لذلك ابتكار عدد من التصميمات ، ونورد بعضاً منها فيما يلي .

الوحدات الصغيرة

بالرغم من أن الفكرة الأساسية لمقطر الانضغاط ترجع إلى مائة عام مضت ، إلا أن الأبحاث والتطورات التي أدت إلى تقدم ملحوظ في هذا النوع من المقطرات لم تبدأ إلا قبيل الحرب العالمية الثانية . ولقد تطورت وحدات صغيرة بحجم صغير لإمداد السفن بماء الشرب . وهذه الوحدات تنتج مابين ٥ر٠ إلى ١٠ أمتار مكعبة يومياً ومُصنَّعة طبقا للفكرة الموضحة في شكل (٥ - ١١) ، أو بغلي ماء البحر خارجياً بينما يتكثف البخار داخليا بالنسبة لوحدة التسخين . أما استهلاك الطاقة في الوحدات التي تدار كهربائيا فبين ٤٠ و ١٠٠ كيلو وات ساعة/متر مكعب من الماء العذب الناتج من ماء البحر . ويزيد استهلاك الطاقة كلما صغرت الوحدة نتيجة للفقد الحراري المرتفع خلال العازل الحراري للوحدات الإنتاجية الصغيرة . أما في الوحدات الكبيرة من هذا النوع ، فإن نصف القدرة الكهربائية فقط يستخدم في الضاغط ، بينما يستهلك النصف الآخر في السخان لتعويض كل الفقد الحراري .

ولقد تطورت وحدات من هذه المقطرات لها آلات احتراق داخلي لتشغيل الضواغط حتى يُمكن للوحدة الاستغناء كلياً عن القدرة الكهربائية . ويُوضح شكل (٥ - ١٣) صورة لوحدة من هذا النوع بإنتاجية حوالي ٥ر٠ متر مكعب من الماء العذب يوميا . كما يُمكن أن تدار هذه الوحدة



شكل (٥ - ١٢)

احتياجات شغل الانضغاط للتقطير بالانضغاط . ماء بحر بتركيز مضعف يغلي عند درجة حرارة ١٠١ر٠٥ م . ويُضغط البخار من ١ جوي إلى ضغط أعلى ويُكثَّف عند درجة حرارة أعلى . ويوضح الرسم شغل الانضغاط المطلوب لكل متر مكعب من الماء المنتج بدلالة درجة حرارة التكثيف . كميات الشغل معطاة لضاغط أدياباتي ذي كفاءة ١٠٠٪ .

باستخدام محرك ديزل . وتُستخدم غازات عادم محرك تشغيل الضاغط في التسخين الإضافي لماء البحر . وهذه الحرارة تكفي لنفس المهمة التي تقوم بها الكهرباء في الوحدات التي تعمل بالطاقة الكهربائية .

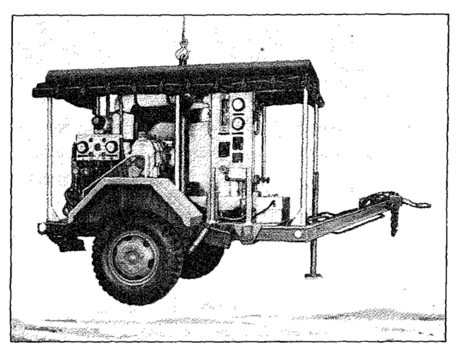
ويقدر استهلاك القدرة ، في الوحدات التي تعمل بالكهرباء من هذا الحجم ، بحوالي من ٢٥ إلى ٣٠ مِثلاً قدرة الضاغط على أحسن الأحوال ، أما قدرة الضاغط فتُقدَّر بحوالي من ١٢ إلى ١٥ ضعفاً الحد الأدنى النظري اللازم لإنتاج ماء عذب في عملية عكسية مثالية . أما في الوحدات التي تُدار بالبنزين أو بمحركات الديزل ، فإن ١ كجم من الوقود يُنتج مايصل إلى ٢٠٠ كجم من الماء النقي . وللحصول على مثل هذه الكفاءة للوقود في المبخرات متعددة التأثيرات ، فإنه يلزمنا استعمال ١٥ مرحلة على الأقل . ولكن ، في هذه الحالة يمكن استعمال أنواع من الوقود أرخص من البنزين أو

من زيت الديزل . ولقد تطور كثير من أنواع المقطرات الصغيرة . وكنتيجة للحجم الصغير وعدم الاعتماد على القدرة الكهربائية في التشغيل ، فلقد لاقت مقطرات الانضغاط ، والتي تدار باستخدام مكنة ، رواجاً كبيرا في بحرية الولايات المتحدة خلال الحرب العالمية الثانية .

ولقد كان من الضروري بعد تطور عملية زارشين للتجميد المباشر Zarchin direct-freezing (الفصل السابع) ظهور نوع خاص من الضواغط التي يمكنها تحريك أحجام كبيرة من البخار ذي الضغط المنخفض . هذه الضواغط والتي تتكون من مراوح كبيرة ذات ريش مرنة ، تعتبر ذات فائدة لوحدات التقطير بالانضغاط ، وبالطبع لايتكون ثلج في هذه الوحدات ولكنها تعمل عند درجات حرارة أقل نسبيا من ١٠٠ م حيث تقل احتمالات تكوين القشور . وكما بيَّنا في شكل (٥ — ٣) ، فإن الضغط في مثل هذه المقطرات يقل عن الضغط الجوي . أما فرق درجات الحرارة عبر أسطح انتقال الحرارة فلا يتعدى عدة درجات مئوية فقط . ويناظر هذا الفرق — عند درجات الحرارة المنخفضة — فروقاً صغيرة في الضغط . فعلى سبيل المثال ، يمثل فرق ضغط البخار بين درجتي ١٠٣ و ١٠٠ م حوالى ١١ر. ضغط جوي ، بينما يمثل فرق الضغط المناظر لدرجتي ٥٣ و ٥٠ م حوالى ٠١٩ر. ضغط جوي (شكل ٥ — ٣) . وعليه ، فإنه بالتشغيل عند درجات حرارة منخفضة يظهر فرق ضغط صغير فقط بين فراغات المبخر والبخار المتكثف . وكنتيجة لفرق الضغط الصغير ، يصبح من الممكن استعمال نافخات طرد مركزية أو محورية غير معقدة نسبيا . أو يمكن القول إن الضغط يمكن أن يتم بجهاز مماثل لنافخ تهوية .

ومن المشاكل الخطيرة في تشغيل مقطرات ضغط البخار عند درجات الحرارة العالية ، سرعة تَكوُّن القشور من ناحية ماء البحر من أسطح انتقال الحرارة . ولصغر فروق درجات الحرارة خلال أسطح انتقال الحرارة ، فإن أي انخفاض في معامل انتقال الحرارة نتيجة تَكوُّن القشور يُمثِّل عائقاً خطيراً لهذه العملية . ويعمل الضاغط بصعوبة كلما تراكمت القشور واستلزم الأمر المحافظة على معدل إنتاج ثابت . ولقد كان من المعتاد في الوحدات الأولى ، إيقاف العمل للتنظيف كل عدة مئات من ساعات العمل اذا استخدم ماء البحر العادي ، وذلك عندما يرتفع ضغط البخار الى ما يتراوح بين ٥٠ و ١٠٠٪ .

وللتغلب على هذه الصعوبات ، ولتقليل التآكل إلى الحد الأدنى ، فلقد صممت وحدات تجارية تعرف باسم أكوا بورت Aquaport (Engineering Zarchin Process Ltd.) تصنيع شركة إنجينيرينج زارشين بروسيس . ويمكن لهذه الوحدات العمل تحت درجة ٤٥ م . وفي هذه الوحدات ، يُرش الماء الملح على السطح الخارجي لانتقال الحرارة لأنابيب أفقية ، مكونا طبقة رقيقة متصلة ، بينما يتكثف البخار المضغوط داخل الأنابيب . وعليه ، فإن أماكن الماء الملح والبخار المتكثف تكون عكس الأماكن الموضحة للوحدة في شكل (٥ — ١١) .



شكل (٥ - ١٣)

مقطر انضغاط صغير . يعمل المقطر باستخدام مكنة احتراق داخلي وينتج ٥ر٠ متر مكعب ماء عذب في كل ساعة . وتزن الوحدة بدون العربة حوالي ٣ر١ طن وبالعربة ٧ر٢ طن . ويمكن رفع الوحدة بالعربة بطائرة هليوكبتر . بإذن من شركة بادجر للتصنيع Badger Manufacturing Company بكمبردج بولاية ماساتشوستس الأمريكية .

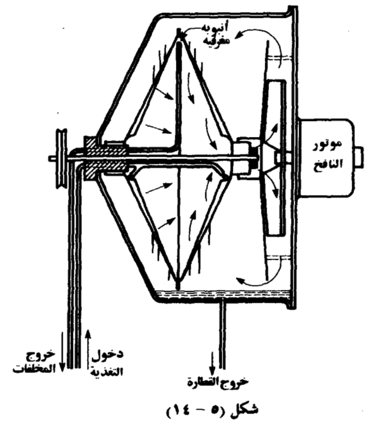
ومن ضمن الحلول التي وُجدت للمقطرات الصغيرة ، استخدام أجهزة الكشط التي تنظف الأسطح باستمرار ، وكذلك الحقن بالحمض . ويجب أن يراعي جيدا عند تصميم الوحدات الكبيرة كل من مشاكل القشور وتقليل احتياجات القدرة إلى الحد الأدنى . وهذه الاعتبارات تُراعي أيضا في تصميم الوحدات الصغيرة ذات درجات الحرارة المنخفضة والتي تعمل عند ضغط مناسب للضواغط ذات الريش المرنة flexible-blade compressors والمُستخدمة لقوة الطرد المركزية للضغط والتي سوف نقدمها في الجزء التالي .

مقطرات الانضغاط بالطرد المركزي

كان أساس الابتكار الذي قدمه ك . س . د . هيكمان K.C.D. Hickman هو دوران سطح التبادل الحراري بسرعة مما يجعل الماء الملح المتبخر ينتشر على شكل طبقة رقيقة مسبباً مُعاملا عاليا لانتقال الحرارة ، حتى عند درجات حرارة منخفضة . ويُمكن لهذه المقطرات أن تعمل بكفاءة عند درجات حرارة منخفضة حتى درجة ٥٠ م عندها لايُمثل تَكوُّن القشور مشكلة خطيرة .

ويوضح شكل (٥ – ١٤) الفكرة الأساسية لمقطر الانضغاط بالطرد المركزي . ويدخل ماء التغذية الملح إلى حيز مُفرغ جزئياً ومُحاط بمخروطين في حركة دورانية . ويتجه ماء التغذية للسطح الداخلي من نقطتين بالقرب من محور دوران المخروطين . وينتشر الماء بتأثير الطرد المركزي ثم يتبخر جزئياً ، بينما يُضغط البخار بنافخ يدور بسرعة أعلى من ضعف سرعة المخروط . ويتكثَّف البخار المضغوط على الجهة الخارجية للمخروط مُعطياً الحرارة اللازمة لتبخير الماء الملح على السطح الداخلي . ويُسحب الماء الملح باستمرار بواسطة أنبوب على شكل مغرفة (أنبوب مغرفية) مثبتة على محيط الدوَّار rotor . وللمحافظة على ضغط منخفض كاف في كل الأوقات ، فإنه من الضروري التخلص من الغازات من ماء التغذية الداخل للمقطر ، بالإضافة إلى التخلص المستمر من الغازات في حيِّز البخار . ويتم ضبط هذه العملية لإزالة الغازات لنزع كل من الهواء – وبالضرورة – بعض بخار الماء ، بالإضافة إلى أنه عند الاستقرار وعند تركيز منخفض معقول ، فإن ضبط نزع الغازات يلزم للمحافظة على كمية الهواء التي تدخل للجهاز نتيجة أي عيب في عملية نزع الغازات من التغذية أو نتيجة أي تسرب ميكانيكي .

ويُبيِّن شكل (٥ – ١٤) رسماً تخطيطياً لمقطرات الانضغاط بالطرد المركزي وبالتالي لاتظهر



شكل (٥ – ١٤)

الفكرة الأساسية لمقطر الانضغاط بالطرد المركزي . عن هيكمان Hickman ١٩٥٨ .

أية تفاصيل . ولتحسين إنتاجية المقطر ، تحتوي الوحدات العملية على إمكانية انتقال الحرارة من كل من الماء الملح والماء العذب الخارجين من المقطر إلى التغذية الداخلة إليه . كما يمكن أيضا استبدال الدوَّار المخروطي بأقراص مسطحة بحيث يمكن للماء أن ينتشر بصورة جيدة مماثلة لحالة المخروط . أيضا يمكن لواحد أو أكثر من الأقراص أو المخروطات أن تثبت أفقياً على عمود دوران رأسي .

ولقد استخلصت الخبرة السابقة لهذه المقطرات أساساً من عدد من الوحدات التجريبية الصغيرة بالإضافة إلى وحدة أبحاث ذات حجم معقول (مقطر هيكمان رقم ٥) والتي ظلَّت تعمل لعدة شهور . وتحتوي هذه الوحدة على حوالي ثمانية دوارات نحاسية بقطر ٢٫٤ متراً لكل منها ومثبتة على عمود رأسي يدور بسرعة ٤٠٠ دورة في الدقيقة . وأُجريت تجارب عديدة بظروف تشغيل مختلفة وكان معدل الإنتاج الأمثل للمقطر حوالي ٦٠ متراً مكعباً يوميا أمكن إنتاجها من حوالي ٢٠٠ متر مكعب من الماء الملح ، وذلك عند درجة غليان حوالي ٥٥ م ودرجة حرارة تكثيف حوالي ٥٢ م . وبالرغم من درجات الحرارة المنخفضة ، فلقد كان معامل انتقال الحرارة خلال جدران الدوَّار حوالي ٢١٠٠ وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-٢}$ درجة فهرنهيت$^{-١}$ ساعة$^{-١}$ ، أي أعلى بثلاثة أمثال القيمة المتوقعة في أنابيب مبادل حراري تقليدي يعمل عند درجة حرارة حوالي ١٠٠ م . أما استهلاك الطاقة فكان حوالي ١٧ كيلو وات ساعة/متر مكعب ، منها ٩٫٥ كيلو وات ساعة استعملت للنافخ ، أما الباقي فاستخدم لتشغيل الدوَّار والمضخات وملحقات أخرى .

ولقد أمكن الحصول على معاملات انتقال حرارة أعلا من القيمة السابقة باستخدام وحدات أصغر من الوحدة السابقة . فباستخدام وحدات معملية بها عدة تحسينات ، أمكن الحصول على معاملات انتقال حرارة تصل إلى ٤٥٠٠ وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-٢}$ درجة فهرنهيت$^{-١}$ ساعة$^{-١}$. ومن عدة وجهات نظر ، فإن المستقبل يبدو مشرقا للوحدات الصغيرة من هذا النوع من المقطرات مما قد يؤهلها في المستقبل للاستعمال المنزلي .

اتحاد التقطير مع توليد القدرة

في بعض الأحيان ، يكون من الأجدى اقتصادياً اتحاد تنقية الماء الملح مع توليد القدرة ، أو دمج عدة طرق للتقطير ، حتى تصبح تكلفة إنتاج الماء العذب أقل من التكلفة لو تم تشغيل كل منها على حدة . وتسمى الوحدات التي تعمل بهذه الطريقة غالبا بالوحدات ثنائية الغرض .

فعند بناء مجتمعات عمرانية جديدة في منطقة نائية عن مصادر القدرة الكهربائية والماء العذب (أو إذا تطلب الأمر زيادة كل منهما) وإذا توفر الماء الملح محليا ، فإنه يمكن استخدام البخار الراجع من المولدات التوربينية ذات الضغط الخلفي لمحطة توليد القوى كمصدر حراري للتقطير . فمثلا اتحدت محطة تقطير سداسية التأثيرات في جزيرة آروبا مع محطة لتوليد القوى .

ويُستخدم البخار ذو الضغط العالي في محطات توليد القوى التقليدية لتشغيل توربينات ثم يتكثف بعد ذلك في مكثفات سطحية تبرد بماء عذب أو ماء البحر ، أيهما توفر . فإذا استبدلت طريقة التشغيل الأخيرة بأخذ البخار الراجع من محطة القوى إلى محطة تقطير بالتبخير الفجائي حيث يكثف هذا البخار في قطاع السخان ، فإن كفاءة إنتاج القدرة سوف تنخفض إذ يتكثف البخار عند درجة حرارة وضغط مرتفعين . وعليه ، يقل كل من انخفاض الضغط عبر التوربينة وإنتاج القدرة لكل كيلو جرام من البخار . فمثلا ، إذا كانت هناك محطة قوى بإنتاجية قدرها ٥٠٠٠٠ كيلو وات تعمل بالبخار المُحمَّي عند ضغط ٩٠ جوي ودرجة حرارة ٥٠٠ م ، فإن هذه المحطة تطرد البخار عند ضغط ١ر٧ جوي للاستعمال في محطة تقطير فجائي ، بدلا من تكثيف هذا البخار بماء ملح بارد إلى ضغط ٠ر٠٤ جوي . هذه العملية تسبب ارتفاعا في استهلاك البخار في محطة القوى قدره ٥٦٪ أي من ٤ر١ إلى ٦ر٤ كيلو جرام لكل كيلو وات ساعة . ويُمكن لحوالي ٥ر٣ كجم من هذه الكمية تشغيل محطة التقطير الفجائي ، بينما يُستعمل الباقي للتسخين المبدئي لماء التغذية في محطة توليد القوى . والسؤال الآن هو : كم يمكن إنتاجه من الماء العذب من هذه الكمية من البخار ؟ وبالرجوع إلى محطات التقطير الفجائي التقليدية نجد أن كل طن من بخار التسخين يمكنه بسهولة إنتاج ٥ طن من الماء العذب . وبزيادة عدد المراحل يمكن تحسين الإنتاجية . ولقد كانت هناك دراسات لتصميم محطات بإنتاجية تصل إلى ١٤ طناً من الماء العذب لكل طن من بخار التسخين . وإذا تحفظنا وفرضنا عشرة أمثال الناتج ، فإن كمية الماء العذب الناتج تصبح ٥٣ لتراً لكل كيلو وات ساعة . وبناء على ذلك ، فإنه يُمكن لمحطة تعمل عند ٦٥٪ من الحمل في المتوسط أن تنتج ٠ر٨٣ متراً مكعباً من الماء العذب يومياً لكل كيلو وات من سعة المحطة . ويمكن بطريقة أخرى القول بأن كل متر مكعب من الماء الناتج يومياً يقابله بالتقريب ١ر٢٠ كيلو وات من سعة المحطة . وبمقارنة هذا باتحاد محطة التقطير السداسية التأثيرات مع محطة القوى الموجودة في جزيرة أُروبا والمصممة على ٢٩ كيلو وات ساعة/متر مكعب ماء ، فإن هذه الإنتاجية تُعادل إنتاجية المحطة الافتراضية للتقطير بالتبخير الفجائي .

وقد يفيدنا أن نسأل : هل تكفي كمية الماء المنتجة ثانويا بمحطة القوى المستفيدين من الطاقة ؟ في مجتمع صناعي متقدم كالولايات المتحدة ، فإن قدرة المُنشأة تُقدر بحوالي ٠ر٧٥ كيلو وات لكل شخص . أما إذا أُقيمت نفس الإنتاجية للقدرة في مجتمع صحراوي افتراضي جديد ، فإن ٠ر٧٥ × ٠ر٨٣ = ٠ر٦٢ طن من الماء يمكن إنتاجها يوميا لكل شخص . ويُعتبر هذا الرقم أقل بقليل من ضعف الاستهلاك المنزلي المتوسط لفرد من هذا المجتمع ، ولكن هذا الرقم أيضاً يناظر سُدُس كمية الماء المستخدمة في الولايات المتحدة لجميع الأغراض فيما عدا الري . وعليه ، فإن كمية المياه المنتجة ثانوياً لاتكفي لتغطية الاحتياجات الصناعية التي تستخدم القدرة إلا إذا : (١) لم تَشمل الصناعات التي تحتاج إلى كميات كبيرة نسبياً من الماء مثل صناعة الورق وعجينة الورق ، (٢) قيام محاولة جدية لإحلال الماء الملح مكان الماء العذب كلما أُتيح ذلك ، (٣) إعادة استعمال الماء

العذب لاستغلاله كاملا . وليس هناك أي أمل في الحاضر لإنتاج كمية كافية من الماء المنتج ثانويا للاستعمال الكامل في الزراعة لإنتاج المحاصيل الحبية ، أو الأرز ، أو أية محاصيل زراعية أخرى مماثلة .

وتقل في العادة تكلفة الماء العذب المنتج بالمحطات ثنائية الغرض عن تكلفته من محطات التقطير ، والتي يلزمها شراء أو توليد البخار لاستقلالها عن محطة توليد القوى .

ومن الوهلة الأولى ، يمكن لأحدنا أن يتعجب ما إذا كانت هناك أية مَيْزة لخفض إنتاج القدرة لمحطة توليد قوى باستخدام محطة تقطير بدلا من مكثف يستخدم ماء البحر البارد . في الواقع ، ليست هناك أية ميزة تكتسب للقدرة إذا استبدلت محطة التقطير بمحطة توليد قوي أخرى (وتعمل بين درجة حرارة وسطية ودرجة الحرارة النهائية لمكثف يُغذِّي بماء البحر البارد) لتعمل بين البخار المحمي الابتدائي والمكثف الأخير . ويجب ، على أي حال ، أن نراعي أن البخار المستنزف جزئيا (عند ضغط ١٫٧ ضغط جوي في المثال المعطي هنا) مطلوب هنا للاستفادة من قيمته النوعية وليس من قيمة إنتاجه للقدرة ، وذلك لأن مقدرة البخار لإنتاج القدرة لايمكن تحقيقها عند تغذية البخار لمحطة التقطير ، وأن القدرة اللازمة لفصل الماء العذب والملح (انظر المناقشة في الفصل الثالث وفي ملحق ١ أ) تقل بكثير جدا عن القيمة المكافئة لسريان الحرارة لمحطة التقطير في شكل بخار تسخين .

ويمكن أيضا استخدام بخار من محطات القوى النووية لتسخين محطات التقطير متعددة التأثيرات أو متعددة المراحل بالتبخير الفجائي . وتسمى مثل هذه المحطات ثنائية الغرض بمحطات إزالة الملوحة النووية بالرغم من خلو قطاع إزالة الملوحة في المحطة من أية عمليات نووية . ويمكن أيضا استخدام البخار الحراري الأرضي **geothermal steam** – إذا توفر – لتشغيل محطات التقطير . كما يمكن استخلاص الحرارة – بغرض الاستفادة منها لإنتاج القدرة أو إزالة الملوحة – من الماء الملح الحراري الأرضي ، ولكن هذه السوائل الملحة غالباً ماتكون لها إمكانية مرتفعة لإحداث التآكل إذا استعملت مباشرة – نتيجة لملوحتها العالية جدا واحتوائها على غازات مشجعة على التآكل مثل كبريتيد الهيدروجين – الأمر الذي أدى إلى استخدام الدوائر ثنائية الموائع **binary fluid cycles** والتي يمكن فيها استخدام الماء الملح الساخن من البئر الحرارية الأرضية لتسخين مائع آخر – أقل تشجيعا على التآكل – لإنتاج القدرة في توربينات أو لتشغيل محطات التقطير . وحالياً – أي في عام ١٩٧٦ – فإن استخدامات الحرارة الأرضية لتسخين محطات التقطير ماتزال في مرحلة التطوير ولاتوجد أية محطات تعمل بهذه الطريقة حتى الآن .

وبالإضافة إلى إدماج محطات القوى مع محطات التقطير ، فإنه يوجد هناك عدد من الإدماجات الداخلية بين عمليات التقطير المختلفة ، ويوجد بعض الوحدات التجارية من هذا النوع . فمثلا ، يمكن دمج مقطرات الانضغاط مع المقطرات متعددة التأثيرات أو المقطرات الفجائية . ويمكن

أيضا دمج التبخير متعدد التأثيرات مع التبخير الفجائي متعدد المراحل . ومثل هذه الإدماجات تثبت في الغالب جدواها الاقتصادية بالمقارنة بمحطات تستخدم طريقة واحدة فقط من طرق التقطير هذه .

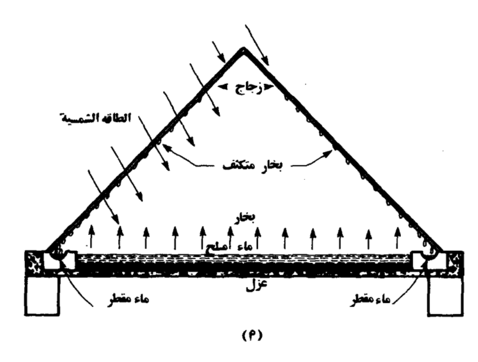
التبخير الشمسي

لكون الحرارة تلعب دوراً هاماً في عمليات التقطير ، فإن ذلك يبدو مغرياً ومشوقاً لاستخدام حرارة الشمس لهذا الغرض . ولقد أُخترع وأُختبر العديد من مثل هذه الأجهزة على مدى قرن من الزمان . وكمثال على ذلك ، بنت شيلي في عام ١٩٧٢ مقطراً شمسياً بمساحة قدرها ٤٠٠٠ متر مربع لإمداد الماء العذب لمنطقة نائية ، وظل هذا المقطر يعمل لعديد من السنوات . ولقد استخدمت في الحرب العالمية الثانية مقطرات شمسية بلاستيكية صغيرة للحصول على الماء العذب للمتعلقين بأطواق نجاة عائمة في المحيط . ولقد شهدت العقود الثلاثة الماضية تطورا كبيرا في هذا المجال نتيجة لتزايد الاهتمام باستخدام الطاقة الشمسية .

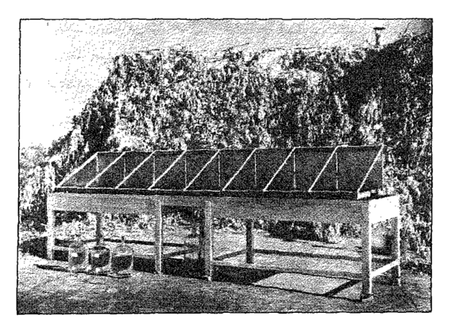
ويوضح شكل (٥ – ١٥ أ) فكرة المقطر الشمسي . يوضع الماء الملح في حوض أسود مغطى بسطح زجاجي مائل ، ويسخن الماء بأشعة الشمس . ويصعد بخار الماء إلى الزجاج حيث يتكثف مكوناً طبقة رقيقة تنحدر إلى أسفل الزجاج حيث تتجمع في حوض التجميع ومنه إلى التخزين .

ولايغلي الماء في هذا النوع من المقطرات ، إنما يتبخر ببطء ، ويصل البخار إلى السطح الزجاجي البارد بالحمل . وتتحكم شدة الإشعاع الشمسي الساقط في معدل التبخير . فإذا لم يكن هناك إشعاع شمسي ، فإن الماء في قاع المقطر يبرد بسرعة مما يخفض ضغط البخار حتى تقف عملية التبخير كلية تقريبا . وفي العادة ، فإننا نميل للتفكير في أن معدلات التبخير تتأثر باضطراب الهواء أو سرعة الرياح . أما في الواقع ، فإن أكبر تأثير في معدلات التبخير يأتي من شدة الإشعاع الشمسي لكل وحدة مساحة من السائل المتبخر في وحدة الزمن . ولايمكننا ، على أي حال ، تركيز طاقة في السائل أكثر مما يستقبله سطح التجميع من الطاقة إذ ثبت أنه يكون أغلى اقتصاديا أن تغطى مساحة الماء في قاع المقطر بعدسات مناسبة ومرايا عاكسة بالمقارنة باستخدام أحواض إضافية أخرى للتبخير . لهذا ، فلقد أثبت الجهاز البسيط في شكل (٥ – ١٥ ب) رواجاً كبيراً ، بالإضافة إلى الدراسات التي قام بها العديد من الباحثين لهذا الجهاز .

وبالرغم من مجانية الطاقة اللازمة للتبخير الشمسي ، إلا أن تكاليف الإنشاء جديرة بالاهتمام ، إذ ينتج المقطر حوالي بضعة لترات من الماء يومياً من كل متر مربع من مساحة قاع المقطر الموضح في شكل (٥ – ١٥ ب) . وبناء على ذلك ، يصبح مهماً جداً تصميم مقطر للاستفادة القصوى من الطاقة الساقطة عليه . ولابد من معرفة كمية الإشعاع الشمسي الساقط في الموقع حيث ستُنشأ محطة التقطير الشمسي ، حتى يمكن تقدير الإنتاج المتوقع من المقطر ، وتقدير الفقد غير الممكن تلافيه .



(أ)



(ب)

شكل (٥ – ١٥)

(أ) الفكرة الأساسية للمقطر الشمسي . يسخن الإشعاع الماء الملح في الحوض الأسود . يتكثف البخار على سطح زجاجي مائل وتنساب القطارة إلى أسفل إلى أحواض تجميع الماء المقطر .

(ب) مقطر شمسي . مساحة الحوض حوالى ٣ متر مربع . قام المؤلف بدراسة تشغيل الوحدة في معهد وايزمان للعلوم في ريهوفت بفلسطين المحتلة ، ١٩٤٨ – ١٩٥٠ . والأسطح المائلة من الزجاج والأسطح الخلفية قد غُلِّفت بطلاء الألومنيوم . الصورة بإذن من ف . اشليزنر ريهوفث F. Schleissner, Rehovoth بفلسطين المحتلة .

سقوط الإشعاع الشمسي

تُقاس كمية الطاقة الشمسية التي تستقبلها وحدة السطح الأفقي باستخدام بيرليومتر pyrheliometer ذي مسجل . ويتكون هذا الجهاز أساساً من شرائط معدنية سوداء وبيضاء توضع في حيز مخلخل الهواء أسفل قبة زجاجية . ونظراً لكون الشرائط السوداء تمتص حرارة أكثر من الشرائط البيضاء ، فإن درجة حرارتها تُصبح أعلى من تلك للبيضاء . وتُسجل فروق درجات الحرارة بين الشرائط السوداء والبيضاء ، وتدل هذه الفروق على كمية الإشعاع الكلية . وتتوفر هذه القياسات في العادة لدى محطات الأرصاد الجوية . وتُمثل هذه القياسات الأساس للتنبؤ بإنتاجية المقطر الشمسي في الموقع الجديد . ويُمثل الجدول (٥ — ٣) كمية الإشعاع الكلي الساقط على وحدة المساحة الأفقية في أماكن مختلفة . وتمثل الأرقام بالجدول جميع طبقات الإشعاع الشمسي : (١) الأشعة المرئية وتمثل بالتقريب أقل من ٤٠٪ ، (٢) الأشعة فوق البنفسجية وتقل عن ٥٪ وتتغير بشدة مع رطوبة الهواء لأن بخار الماء يمتص الإشعاع فوق البنفسجي ، (٣) الأشعة تحت الحمراء وتمثل حوالي من ٥٥ إلى ٦٠٪ من الطاقة بالرغم من أنها أشعة غير مرئية . ولقد أُعطيت هذه الأرقام من الإشعاع لوحدات عديدة ذوات أعماق مختلفة للماء في قاع المقطر ، وقُدِّرت الكمية التي يمكن أن تتبخر يومياً عندما يعمل المقطر بكفاءة حوالي ٥٠٪ ، أي أن ٥٠٪ من الإشعاع الكلي المقاس بالبيرليومتر قد استخدمت في التبخير .

ويمكن زيادة الاستفادة من الإشعاع الشمسي بدوران السطح المستَقْبِل للإشعاع باستمرار حتى يبقى الإشعاع دائما عمودياً على السطح . فمثلا ، عند خط العرض الجغرافي ٣٥° يمكننا زيادة الاستفادة بحوالي ٥٨٪ من الإشعاع . وهذا المكسب الصغير نسبيا يبدو غير مقنع للتكلفة المرتفعة لآلة الدوران في أجهزة التقطير الشمسي البسيطة . لهذا ، فإن المقطرات الثابتة — والتي تميل إلى المستوى الأفقي بزاوية تعادل درجة خط العرض — تحصر طاقة شمسية أكبر من المقطرات الأفقية . وبالرجوع إلى خط عرض ٣٥° ، فإن التحسن قد يصل إلى ١٦٪ من الطاقة الساقطة على سطح أفقي . ولقد طوَّرت د . ماريا تيلكس — وهى واحدة من الرعيل الأول في استخدامات الطاقة الشمسية — هذا المقطر . ويوضح شكل (٥ — ١٦) هذا المقطر .

ومن المهم أيضاً مقارنة كمية الحرارة التي تستقبلها وحدة سطح التبخير في مقطر شمسي بسيط بالحرارة التي تنتقل خلال أنابيب التسخين في مقطر تقليدي . فلنفترض أن معامل انتقال الحرارة في المقطر الأخير حوالي ٥٠٠ وحدة حرارة بريطانية قدم$^{-٢}$ درجة فهرنهيت$^{-١}$ ساعة$^{-١}$ أو ١٢٠٠٠٠ وحدة حرارة بريطانية تنقل لكل قدم مربع يوميا عندما يكون فرق درجات الحرارة خلال الأنبوب حوالي ١٠ درجات فهرنهيت (٥ر٥°م) . ويَكْبُر هذا بحوالي ١٢٠ مثلًا عن الحرارة الشمسية المستخدمة للتبخير في الجزائر بفرض الاستفادة من ٥٠٪ من الإشعاع الساقط . وتوضح

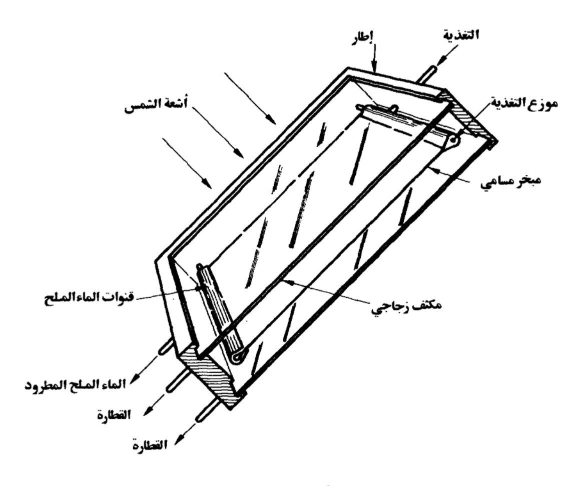
جدول (٥ - ٣)

متوسط الإشعاع الشمسي على سطح أفقي في أماكن مختلفة*

المكــان	وحدة حرارة بريطانية لكل قدم مربع يوميا — التغيـــر	وحدة حرارة بريطانية لكل قدم مربع يوميا — المتوسط السنوي	سعر يوميا لكل سم^2	عمق التبخير سم يومياً (كفاءة ٥٠٪)**	جالون أمريكي يوميا لكل قدم مربع (كفاءة ٥٠٪)
البازو ، تكساس	١٢٠٠ – ٢٧٣٠	٢٠٣٠	٥٥١	٠ر٤٨٥	٠ر١١٩
تامانرست ، الجزائر	١٤٦٠ – ٢٤٠٠	٢٠٠٠	٥٤٢	٠ر٤٧٧	٠ر١١٧
بونا ، الهند	١٤٣٠ – ٢٦٩٠	١٩٨٠	٥٣٧	٠ر٤٧٣	٠ر١١٦
فنكس ، أريزونا	١٠٦١ – ٢٧١٠	١٩٢٥	٥٢٢	٠ر٤٦٠	٠ر١١٣
ميسينا ، جنوب أفريقيا	١٣٤٠ – ٢٣٢٠	١٨٧٥	٥٠٨	٠ر٤٤٧	٠ر١١٠
نيس ، فرنسا	٥٧١ – ٢٥٢٥	١٥٠٠	٤٠٧	٠ر٣٥٨	٠ر٠٨٨
سولت لاك سيتي ، يوتاه	٤٤٣ – ٢١٩٢	١٤٤٢	٣٩٢	٠ر٣٤٥	٠ر٠٨٥
بوسطن ، ماساتشوستس	٥٠٢ – ١٩٣٨	١٢٤٠	٣٣٦	٠ر٢٩٦	٠ر٠٧٣
لندن ، انجلترا	١٨١ – ١٧٤٠	٨٨٢	٢٣٩	٠ر٢١٠	٠ر٠٥٢
انتراكتيكا	صفر – ٧٣٥				

* عن لوف (١٩٥٨) . يرجع التغير إلى متوسط الإشعاع اليومي في أشهر أدنى وأقصى تبخير على التوالي . كل الأرقام تشير إلى المتوسط السنوي .

** تؤخذ حرارة التبخير مساوية ٥٧٠ كيلو سعر/لتر مناظراً لدرجة حرارة متوسطة للماء قدرها ٢٥°م .



شكل (٥ – ١٦)

مقطر شمسي مائل مسطح . عن تيلكس Telkes ١٩٥٨ .

هذه المقارنة أنه يجب أن تنخفض تكاليف المقطر الشمسي لكل وحدة مساحة لانتقال الحرارة بالمقارنة بالمقطرات التقليدية ليصبح رأس مال المقطرات الشمسية منافساً لرأس مال المقطرات التقليدية . وبالطبع ، فإن تكلفة تشغيل المقطرات الشمسية أقل بكثير ، إذ إن الحرارة بدون مقابل . وبالرغم من أن إنتاجية المقطرات الشمسية لكل وحدة مساحة تبدو صغيرة من المقارنة ، إلا أنه يجب مراعاة أنه يمكن تغطية مساحات كبيرة بالمقطرات الشمسية . فمثلا مساحة ١ كيلو متر مربع لمقطر في الجزائر – والتي تستلزم تقريبا ٣ر١ كيلو متر مربع من المنشأة الكلية – سوف ينتج ٧ر١ مليون متر مكعب من الماء العذب سنويا إذا كانت الكفاءة الحرارية تعادل ٥٠٪ . وبطريقة أخرى ، فإن طبقة من الماء بعمق ٧ر١ متر يمكن أن تتبخر سنوياً من مساحة الحوض . أما إذا استخدم التبخير الشمسي لتوفير مياه الري ، وإذا كانت كمية مياه الري اللازمة تعادل ٦٠ سم من ماء المطر سنويا ، فإن ١ كيلو متر مربع من مساحة حوض التبخير تلزم لري كل ٣ كيلو متر مربع من الأرض .

ولقد افترضت كفاءة قدرها ٥٠٪ في هذه التقديرات ، وبالطبع هذه التقديرات ماهي إلا تنبؤ نأمل أن يتحقق في المستقبل . ولقد أظهرت الحسابات أن كفاءة سنوية متوسطة حوالي ٥٠٪ تمثل الحد الأعلى لتشغيل المقطر الشمسي من النوع السطحي ، وذلك حتى عند وجود ظروف مناخية جيدة .

الكفاءة والفقد في مقطرات النوع السطحي

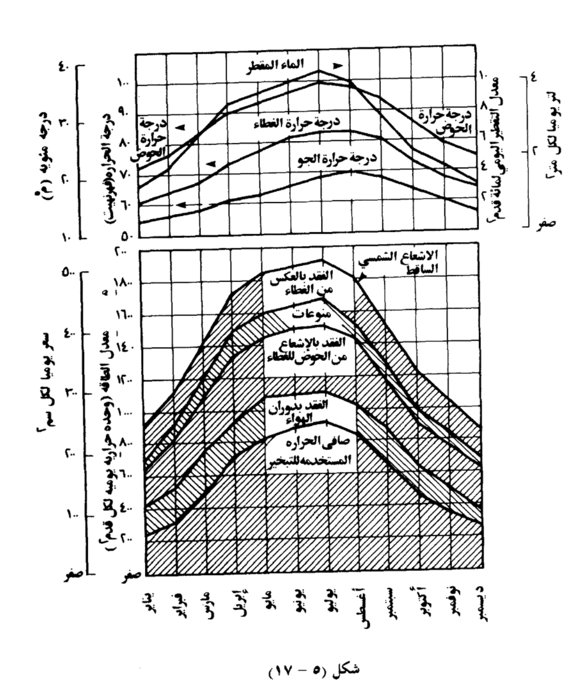
السؤال الآن ، إلى أي مدى يمكن تقليل الفقد في الحرارة الشمسية للحد الأدنى ؟ يعتمد الفقد على : (١) الأحوال الجوية ، مثل شدة الإشعاع الشمسي ، درجة حرارة الجو ، وسرعة الرياح ، (٢) تصميم المقطر . أما الأحوال الجوية فلا يمكن تغييرها ، بينما يشمل تصميم المقطر متغيرات كثيرة أهمها طبيعة المواد المستخدمة ، وشكل واتجاه المقطر ، وسمك الطبقة المبخرة . وتؤثر هذه العوامل على التغير اليومي في درجة حرارة الماء الملح الموجود في قاع المقطر والتي بالتالي تؤثر بشدة على الفقد من المقطر .

ولحساب كفاءة المقطر الشمسي المتوقعة لموقع ما بمعرفة أحواله الجوية ، فإنه يلزم عمل حسابات كل ساعة لدرجة حرارة الماء الملح ، وللفقد فى الحرارة إلى الجو المحيط . ويجب السماح بتخزين الحرارة في الماء الملح لأن درجة حرارة الماء الملح تختلف في العادة بين بداية ونهاية كل ساعة . ولقد أُجريت بعض الطرق التجريبية الخاصة لحسابات مماثلة للتبخير من أحواض مفتوحة . وبعض من تلك الحسابات نفذت أيضا للمقطرات الشمسية المغطاة ، ولكن هذه الحسابات مملة عموما . وعليه ، فإنه تقام تقديرات تقريبية للفقد باستخدام القيم الشهرية المتوسطة للمتغيرات الجوية . وتلائم هذه الطريقة المقطرات الشمسية ذات الأحواض العميقة والتي تحتوي على طبقات من الماء الملح بعمق حوالي ٣٠ سم وذلك لضمان أن يبقى التغير اليومي في درجة حرارة الماء الملح أقل منه في المقطرات ذات الأحواض الضحلة والتي تسخن بسرعة في الصباح وتبرد بسرعة في المساء . ويلاحظ أنه في المقطرات ذات الحوض الضحل يتم التقطير بمعدل أسرع في ساعات النهار منه للمقطرات ذات الحوض العميق ، ولكن عمليا تصبح عملية التقطير منعدمة للمقطرات ذات الحوض الضحل ليلا . ومن وجهة نظر أخرى ، فإن المقطرات ذات الحوض العميق لها سعة تخزين حرارية أعلى . وتسخن هذه المقطرات ببطء بالمقارنة بالمقطرات ذات الأحواض الضحلة ، كما تصل درجة الحرارة القصوى في الحالة الأولى متأخرة عنها في الحالة الثانية ، ولكن تمتاز الحالة الأولى باستمرار التقطير لجزء من الليل ، وكلما زاد عمق طبقة الماء في حوض المقطر كلما انخفض التغير في درجة حرارة الماء الملح خلال فترة ٢٤ ساعة ، وكلما طال الوقت بين زمن أقصى شدة إشعاع شمسي – والتي تحدث في العادة قرب الظهيرة – وزمن وصول الماء الملح إلى أقصى درجة حرارة له .

ويوضح شكل (٥ – ١٧) نتائج مثل هذا النوع من الحسابات لمقطر شمسي كبير افتراضي في بلدة سان دييجو بولاية كاليفورنيا ، أي عند خط عرض ٣٣° شمالا . ولقد افتُرِض عند القيام بهذه الحسابات أن ماء البحر يُركَّز إلى ضعف تركيزه الابتدائي ، وأن تتم عملية تبادل حراري لماء البحر الوارد للمقطر مما يرفع درجة حرارته إلى درجة حرارة الماء المقطر ، وأن الماء الملح يمتص حوالي ٩٥٪ من الإشعاع المنقول عبر الغطاء ، وأن المقطر وضع مباشرة على الأرض بدون أي عزل حراري أسفل الحوض . ولقد بُنى الفرض الأخير على أساس أن التربة أسفل المقطر سوف تعمل كعازل حراري بعد فترة التسخين الابتدائية . (يفترض أن الفقد بالإشعاع يزيد بزيادة درجة الحرارة المطلقة مرفوعة إلى الأس الرابع – قانون استيفَن **Stefan's Law**) .

ومن المهم مقارنة هذه التنبؤات بقياسات الفقد الفعلي لمقطر بغطاء زجاجي من هذا النوع . ولقد أُجريت القياسات في أكتوبر ١٩٥٩ في منطقة بورت أورانج بولاية فلوريدا (خط عرض ٢٩° شمالا) من ضمن دراسة شاملة للمقطرات الشمسية . والنتائج مُجَدولة في جدول (٥ – ٤) . ولقد حُسب الفقد من قياسات معملية للماء الملح للبخار ، وللغطاء ، ولدرجات حرارة الهواء بالإضافة إلى قياس صافي الإشعاع بين المقطر والمحيط به بواسطة راديومتر **radiometer** (مقياس الإشعاع) . وبالرغم من أن الموقع والأحوال الجوية لاتتماثل تماما مع القيم المناظرة في سان دييجو – إلا أن النتائج مشابهة تماما للنتائج التي أمكن التنبؤ بها لنفس القيمة المتوسطة للإشعاع الشمسي في منطقة سان دييجو . ويمكن خفض الفقد غير المعروفة أسبابه بتحسين التصميم ، وعلى سبيل المثال ، تحسين مظلات أحواض تجميع الماء المتكثف .

ولقد اختبرت التحويرات الكثيرة التي أدخلت على الفكرة الأساسية للمقطر الشمسي الموضح في شكل (٥ – ١٥) . ولقد أظهرت الخبرة أن العامل المؤثر في حساب إنتاجية المقطر هو المتوسط الشهري لشدة الإشعاع الشمسي ، بينما يأتي تأثير العوامل الجوية في المرتبة الثانية . ويُوضح شكل (٥ – ١٨) هذه النتيجة في الرسم البياني بين الناتج والإشعاع . وبينما تظهر العلاقة بين الإنتاج اليومي وشدة الإشعاع مبعثرة نسبياً ، إلا أن قيم متوسط الإنتاج الشهري جاءت على خط مستقيم ، هذا بالرغم من أن التجارب الممثلة هنا قد أجريت في منطقتين متباعدتين تماما وباستخدام مقطرات مختلفة التصميم . فلقد كان المقطر الذي استخدم في بورت أورانج بولاية فلوريدا مقطراً عميق الحوض ، أما المقطر الاسترالي فكان ضحل الحوض وطُوِّر في الجزائر من ملاط (اسمنت) ليفي **fibrocement** . وبالطبع يكون من غير المعقول توقع هذه الكفاءة من كل مقطر شمسي . ولقد أمكن في بعض الأحيان تسجيل كفاءات أعلى ، مثل المقطرات الموجودة في ميلدورا بأستراليا أو مثل تجارب المؤلف بفلسطين المحتلة لمقطر ذي خلفية من عاكس مسطح ثابت مغطى بدهان الألومنيوم (شكل ٥ – ١٥ ب) . وبالطبع فإنه من المتوقع تحسين التشغيل مستقبلا بتحسين مواد التصنيع .



شكل (٥ – ١٧)

تقدير التشغيل لمقطر شمسي عميق الحوض في سان دييجو بكاليفورنيا . عن لوف Löf ١٩٦٠ .

جدول (٥ – ٤)
اتزان الطاقة لمقطر شمسي*

الطاقة	النسبة المئوية من الإشعاع الشمسي
التبخير	٣٢
الحرارة المفقودة للأرض	٢
الإشعاع الشمسي المنعكس بالمقطر	١٢
الإشعاع الشمسي الممتص بالغطاء وطبقة البخار المتكثف	١٠
الإشعاع من الماء في الحوض	٢٥
الحمل الحراري الداخلي (الفقد بدوران الهواء)	٧
الفقد غير معروف السبب ، ربما إعادة تبخير القطارة	١٢
	١٠٠

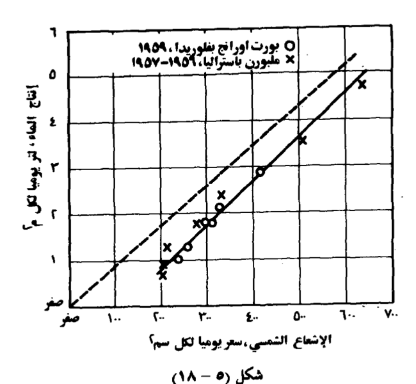
ويوضح شكل (٥ – ١٨) أيضا خطاً افتراضياً لكفاءة ٥٠٪ . ويمثل الخط الناتج من مقطر يستخدم نصف الإشعاع الساقط (المقاس ببيرليومتر) في عملية التقطير . ويُمكن أن نرى أن جميع النقط المقاسة تقع أسفل هذا الخط ولكن النسبة المئوية للاستفادة من الطاقة الشمسية تزيد مع زيادة الطاقة الساقطة على المقطر . وفي الواقع ، لو لم تتغير الحرارة الممتصة بالماء الملح مع التوقيت اليومي ، وكانت باستمرار مرتفعة – مثل أوقات الذروة عند الظهيرة – لكان من الممكن الوصول إلى كفاءات تصل إلى ٦٥ – ٧٥٪ كما هو موضح بالحسابات والتجارب المعملية باستخدام تسخين كهربائي بدلا من التسخين الشمسي .

تحسين الناتج

كما يظهر من شكل (٥ – ١٧) ومن جدول (٥ – ٤) ، فإن الفقد الرئيس للحرارة في المقطر الشمسي يرجع إلى الإشعاع طويل الموجة المنتقل من الماء الملح في الحوض إلى الغطاء . ويبدو

* عن لوف (١٩٥٨) . يرجع التغير إلى متوسط الإشعاع اليومي في أشهر أدنى وأقصى تبخير على التوالي . كل الأرقام تشير إلى المتوسط السنوي .

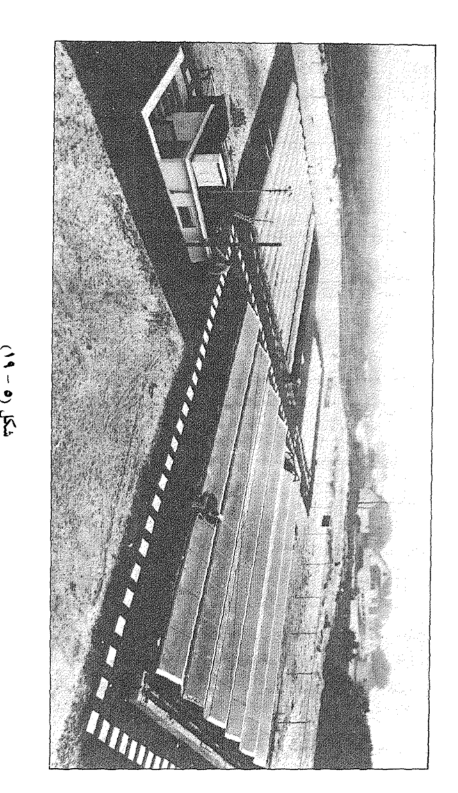
** تؤخذ حرارة التبخير مساوية ٥٧٠ كيلو سعر/لتر مناظرة لدرجة حرارة متوسطة للماء قدرها ٢٥°م .



شكل (٥ – ١٨)

إنتاج المقطرات الشمسية . الأرقام على المحور الأفقي تشير إلى المتوسط الشهري . ويشير الخط المنقط إلى إنتاج مقطر افتراضي بكفاءة ٥٠٪ . النتائج عن بلومر وآخرين . **Bloemer *et al*** (١٩٦٠) وويلسون **Wilson** (١٩٥٨) .

أن هناك القليل الذي يمكن فعله لخفض هذا الفقد مالم يتم اختيار عمق مناسب للماء الملح لتقليل المتوسطات اليومية لهذا الفقد طبقا للأحوال الجوية . أما كمية الحرارة الأرضية المفقودة فهى في العادة كمية صغيرة إذا كانت مساحة الأرض كبيرة وأُبقيت الأرض جافة للمحافظة على عزل حراري جيد . ويرتبط الفقد الحراري بالحمل بمعدل التقطير وسوف تؤثر التغيرات في معدلات الدوران في كل من الفقد الحراري بالحمل ومعدل التقطير ، ويكون التأثير بشكل متماثل في كل منهما (ملحق ٤ أ) . ومن ناحية أخرى ، يمكن تخفيض انعكاس الإشعاع وامتصاصه بالزجاج من خلال اختيار أغطية من نوع خاص أو معالجة مادتها لتحسين أدائها . ومن الممكن معالجة الزجاج لخفض انعكاسيته ، كما يُمكن تخفيض امتصاص الضوء في الغطاء باستخدام أغطية من طبقات رقيقة بدلًا من الزجاج . وفي الواقع ، فلقد تم تصميم وبناء ودراسة العديد من المقطرات بأغطية بلاستيكية . ولقد أُجريت دراسة شاملة لواحد من هذه المقطرات يغطي مساحة ٢٠٠ متر مربع ، بالإضافة إلى بعض المقطرات عميقة الحوض – وبمساحة مماثلة – في منطقة بورت أورانج بفلوريدا بدعم من مكتب المياه الملحة **Office of Saline Water** (وهى الآن جزء من مكتب أبحاث الماء والتكنولوجيا) بوزارة الداخلية بالولايات المتحدة (شكل ٥ – ١٩) . كما قام القطاع الخاص الصناعي بتطويرات أُخرى في هذا المجال .



شكل (٥ - ١٩)

مقطرات شمسية بموقع دينونا بيتش بورت أوراغ بفلوريدا . الصورة بإذن من مكتب المياه المالحة بوزارة الداخلية للولايات المتحدة .

وكما يبدو ، فإن استبدال زجاج الغطاء بطبقات رقيقة من البلاستيك له إغراء اقتصادي للوهلة الأولى . ويمكن الإبقاء على المقطرات البلاستيكية منتفخة بزيادة الضغط داخل المقطر زيادة طفيفة . ولقد أظهر الكثير من المقطرات البلاستيكية إنتاجية منخفضة نسبياً بالمقارنة بالمقطرات الزجاجية ، وذلك نتيجة التسرب تارة ونتيجة التكثف المتقاطر لبخار الماء على السطح السفلي للغطاء المانع لالتصاق الماء تارة أخرى . وتنمو هذه القطرات إلى حجم كبير قبل انحدارها إلى قنوات القطارة ، وفي بعض الأحيان ، تسقط إلى الماء الملح مرة أخرى . ولقد تطورت وسائل معالجة طبقات البلاستيك لجعلها أقل مقاومة لالتصاق الماء ولمنع تدهور بعض أنواع طبقات البلاستيك بالتعرض للإشعاع . ومن المثير أن التكثف المتقاطر للبخار في محطات التقطير التي تعمل بالوقود يعتبر ذا فائدة ، بينما العكس صحيح في التقطير الشمسي . وتوضح هذه الحقيقة أن تنوع طرق التقطير ضروري لمواجهة مشاكل تطور تنقية المياه الملحة الحديثة .

الأنواع الأخرى للمقطرات الشمسية

كنتيجة للإنتاجية المنخفضة نسبياً للمقطرات الشمسية لكل وحدة مساحة ، بالمقارنة بطرق التقطير الأخرى ، أجريت محاولات للاستفادة من الطاقة الشمسية الساقطة في التقطير لعدة مرات قبلما تطرد الحرارة غير المفيدة . فبالرجوع إلى المقطرات البسيطة من النوع السطحي **roof type** فإن حرارة تكثف البخار على الغطاء الزجاجي ، والتي لايمكن الانتفاع بها ، تنقل بعيداً بالهواء وبالإشعاع إلى الجو . أيضا ، توجد براءة اختراع للمقطرات الشمسية المتعددة التأثيرات ، ولكن هناك افتقاراً إلى النتائج والاختبارات التي يمكن الاعتماد عليها .

وفي بعض الأجهزة الأكثر تعقيدا من المقطرات الشمسية البسيطة ، يُمكن الوصول إلى درجات حرارة مرتفعة للماء . وباستخدام مرايا اسطوانية أو مكافئية المقطع **parabolic** لتركيز الطاقة الشمسية ، يُمكن إنتاج بخار لتشغيل توربينات ومحطات إزالة ملوحة تقليدية . وبالرغم من أن تجميع وتركيز الطاقة الشمسية من الموضوعات الشيقة ، إلا أن هذا الموضوع لن يعالج هنا إذ أثبتت هذه الأجهزة بصفة عامة غلاء سعرها لتنقية الماء الملح . وبالرجوع إلى المقطرات الشمسية المُستخْدِمة لأجهزة تركيز الإشعاع ، فإن مراحل التسخين والتقطير تبعد عن بعضها البعض في العادة ، بينما بالرجوع إلى المقطرات البسيطة والموضحة في أشكال (٥ – ١٥) و (٥ – ١٦) فإن امتصاص الإشعاع ، والتبخير ، والتكثيف تحدث جميعها في نفس الجهاز .

تكاليف المقطرات

أظهرت الخبرة أن التكلفة الابتدائية للمقطرات الشمسية تعتبر أعلى بكثير من تكلفة معدات الطرق الأخرى لإزالة الملوحة .

ومن جهة أخرى ، فإن التصميم المبسط للمقطرات الشمسية من النوع السطحي ، والمصنوعة من معدن أو من ملاط ليفي وزجاج ، يجعل هذه الوحدات مناسبة لإنتاج كميات محدودة من الماء المقطر في المناطق النائية والتي لديها فائض من المياه الملحة ونقص في المياه العذبة . هذا ولقد استخدمت مقطرات شمسية فعلية – بدرجات نجاح متفاوتة – في جزيرة سيمي باليونان وبمنطقة التعدين في كوبر بدي بأستراليا . وهذه المقطرات لاتُستعمل عموما في القواعد العسكرية لسهولة تخريبها عن طريق الأعداء . ومن جهة أخرى ، فلقد اقترح دمج الزراعة بالبيوت الزجاجية مع التقطير الشمسي وقد تُثبت هذه الفكرة أهميتها في بعض الظروف الخاصة .

مراجع مختارة

مبخرات الأنابيب المتعددة التأثيرات والمبخرات الفجائية المتعددة المراحل

Multiple-Effect Tube and Multistage Flash Evaporators

Standiford, F.C., "Evaporation," *Chemical Engineer's Handbook,* R.H. Perry and C.H. Chilton, eds., 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1973, Chapter 11,pp.27-38.

Badger, W.L., and Standiford, F.C., "Large-Scale Multiple- Effect Sea-Water Evaporation Plants," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion* 1957, National Academy of Sciences-National Research Council, Publ. 568, Washington, D.C., 1958, p.103.

Eshaya, A.M., and Dodge, B.F., "Application of Forced-Circulation and Drop-Wise Condensation Techniques to Large-Scale Distillation of Sea Water," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion 1957,* National Academy of Sciences-National Research Council, Publ. 568, Washington, D.C., 1958, p.73.

Silver, R.S., "A Review of Distillation Processes for Fresh-Water Production from the Sea," *Fresh Water from the Sea, Dechema Monographie,* Vol. 47, Verlag Chemie, Weinheim-Bergstrasse, West Germany, 1962.

Bairamov, R.B., Ataev, Ya. A., and Tairov, B.D., "Analysis of Thermal Schemes for Evaporative Desalination Plants," *Izv. AN Turkm. SSR Ser. Fiz.- Tekh. Khim. Geol. Nauk,* No.4, 1975, Soviet Union, translated in *Int. Chem. Eng.* **16** (3):387 (1976).

Van der Mast, V.C., Read, S.M., and Bromley, L.A., "Boiling of Natural Sea Water in Falling-Film Evaporators," *Desalination* **18**:71 (1976).

تصميم محطات التقطير الفجائي Design of Flash-Distillation Plants

Frankel, A., "Flash Evaporators for the Distillation of Sea Water," *Proc. Inst. Mech. Engrs* (London) **174**:312 (1960).

Mulford, S.F., "Low Temperature Flash Distillation of Sea Water," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion 1957,* National Academy of Sciences-National Research Council Publ. 568, Washington, D.C., 1958, p.91.

Distillation Plants in Kuwait محطات التقطير بالكويت

Reside, J., and Al-Adsani, A.M.S., "The World's Largest Desalting Complex-A Report of Twenty Years' Experience," *J.Natl. Water Supply Improvement Assoc.* **1**:1 (1974).

Shuhaibar, Y.K., "Near East Desalting," *Desalination* **17**:69 (1976).

Hong Kong Desalting Plant محطات إزالة الملوحة بهونج كونج

NWSIA (National Water Supply Improvement Association) Newsletter (October 1976); P.O. Box 8300, Fountain Valley, Calif. 92708.

Drake, F.A., "Desalting in Hong Kong-The First Phase," *Desalination* **18**:1 (1976).

استخدام مخفضات التوتر السطحي لزيادة انتقال الحرارة
Use of Surfactants to Increase Heat Transfer

Sephton, H.H., *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fresh Water from the Sea, Alghero, Sardinia, 1976,* for sale by A.A. and A.E. Delyannis, Tsaldari St. 34, Athens-Amaroussion, Greece.

Vapor-Reheat Process عملية إعادة تسخين البخار

Othmer, D.F., Benenanti, R.F., and Goulandris, G.C., "Vapor Reheat Flash Evaporation without Metallic Surfaces," *Chem. Eng. Progr.* **57** (1):47 (January 1961).

Woodward, T., "Vapor Reheat Distillation," Chapter 4 in *Principles of Desalination,* K.S. Spiegler, ed., Academic Press, New York, 1966.

Compression Distillation التقطير بالانضغاط

Latham, A., "Compression Distillation," *Mech. Eng.* **68** (3):221 (1946).

Hickman, K.C.D., "Centrifugal Boiler Compression Still," *Ind. Eng. Chem.* **49**:786 (1957).

Hickman, K.C.D., "Development of the Centrifugal Compression still," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion, 1957,* National

Academy of Sciences-National Research Council Publication No.568, Washington, D.C., 1958, p.51.

Dual-Purpose Plants المحطات ثنائية الغرض

Aschner, F.S., Yiftah, S., Glueckstern, P., Frank, G., and Lavie, A., *"Feasibility of Nuclear Reactors for Sea-Water Distillation,"* 1964-1967, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, Contract 252/RB, Microfiche IAEA-252-F, 1968.

d'Orival, M., *Water Desalting and Nuclear Energy,* Verlag Karl Thiemig KG, Muenchen 90, West Germany, 1967.

Vilentchuk, I., "Sea Water Conversion Requires Nation-Wide Planning" *Aqua* 1:53 (1961).

Use of Geothermal Heat استخدام الحرارة الأرضية

El Ramly, N.A., Peterson, R.E., and Seo, K.K., "Geothermal Wells in Imperial Valley, California: Desalting Potentials, Historical Development and a Selected Bibliography," *J.Natl. Water Supply Improvement Assoc.* 1:31 (1974).

Laird, A.D.K., "Water from Geothermal Resources," *Geothermal Energy,* P. Kruger and C. Otte, eds., Stanford University Press, Stanford, Calif., 1973.

Solar Evaporation التبخير الشمسي

Bloch, R.M., Farkas, L., and Spiegler, K.S., "Solar Evaporation of Salt Brines," *Ind. Eng. Chem.* 43:1544 (1951). Open pans for salt recovery.

Bloemer, J.W., Collins, R.A., and Eibling, J.A., "Field Evaluation of Solar Sea Water Stills," *Advances in Chemistry Series,* No.27, American Chemical Society, Washington, D.C., 1960, p.166.

Bloemer, J.W., Eibling, J.A., Irwin, J.R., and Lof, G.O.G., "Solar Distillation- A Review of Battelle Experience," *Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination,* Vol.2, Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C., 1965, p.609.

Howe, E.D., "Solar Distillation," *Solar Energy Research,* F. Daniels and J.A. Duffie, eds., University of Wisconsin Press, Madison, 1955.

Gomella, C., "Traitement et utilisation des eaux saumatres dans les régions

arides," *Salinity Problems in the Arid Zones, (Proc. Tehran Symp.),* Documents and Publications Service UNESCO, Paris, 1960, p.331.

Lõf, G.O.G., "*Demineralization of Saline Water with Solar Energy,*" Research and Development Progress Report No.4, Office of Saline Water, Department of the Interior, Washington, D.C., 1954.

Lõf, G.O.G., "Design and Cost Factors of Large Basin-Type Solar Stills," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion 1957,* National Academy of Sciences-National Research Council Publ. 568, Washington, D.C., 1958, p.157.

Lõf, G.O.G., "Design and Operating Principles in Solar Distillation Basins," *Advances in Chemistry Series* No.27, American Chemical Society, Washington, D.C., 1960, p.156.

Lõf, G.O.G., "Solar Distillation," *J.Am. Water Works Assoc.* **52**:578 (1960).

Telkes, M., "Fresh Water from sea water by solar Distillation," *Ind. Eng. Chem.* **45**:1108 (1953).

Telkes, M., "Solar Still Theory and New Research," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion 1957,* National Academy of Sciences-National Research Council Publ. 568, Washington, D.C., 1958, p.137.

Wilson, B.W., "Solar Distillation Research and Its Application in Australia," *Proceedings of the Symposium on Saline Water Conversion 1957,* National Academy of Sciences-National Research Publ. 568, Washington,D.C., 1958, p.123.

Ronchaine, J.F.M., "Combinasion de la climatisation et du dessalement," *Bull. Recherches Agronomiques de Gembloux, Belgique* (hors série, 1971). Combination of greenhouse-type agriculture with solar distillation.

Some General Journals on Solar Energy بعض المجلات العامة في مجال الطاقة الشمسية

Solar Energy, Published Quarterly by Pergamon Press, Headington Hill Hall, Oxford OX 3 OBW, U.K., for the International Solar Energy Society, P.O. Box 52, Parkville, Victoria, Australia 3052.

Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika), Allerton Press, 105 Fifth Avenue, New York 10011.

Solar Energy Digest, P.O. Box 17776, San Diego, Calif. 92117.

٦ الديلزة الكهربائية

■ الفكرة الأساسية ■ احتياجات القدرة ■ الأداء الأمثل للمحطة ■ الأغشية
■ الفواصل ■ الأقطاب ■ الاستقطاب والتقشر ■ مصدر القدرة الكهربائية
■ تقويم مقارن للوحدات ■ مراجع مختارة

الفكرة الأساسية

في جميع طرق التقطير ، يُنزع بخار الماء من المياه الملحة ثم يُكثَّف بعيدا عن الماء الملح . وكنتيجة لاستخدام مياه البحر ، حتى عام ١٩٧٦ ، كمصدر لإزالة أملاح المياه ، ونظراً لأن التقطير كان أفضل طريقة حتى هذا التاريخ ، فإن أكثر من أربعة أخماس المياه منزوعة الملوحة في العالم كانت تُنتج بإحدى طرق التقطير المختلفة . ومع ازدياد الحاجة لإعذاب الماء الأخضم ازدادت أهمية الطرق الغشائية ، والتي تعتبر أفضل اقتصاديا لمعالجة المياه ذات الملوحة المنخفضة نسبياً عن ماء البحر . فعلى سبيل المثال ، ستعالج مياه صرف الري الملحة لمصرف مولتن وموهوك العائدة إلى نهر كالورادو بأريزونا بطرق غشائية لمنع زيادة الملوحة بالجزء السفلي لنهر كالورادو والذي يُغذِّي جزءاً من شمال المكسيك . كما يمكن أيضا استخدام الطرق الغشائية لإعذاب مياه البحر . وبالرغم من إمكانية استخدام هذه الطرق الغشائية في كل من الديلزة الكهربائية electrodialysis والتناضح العكسي reverse osmosis (الفصل التاسع) ، إلا أن الجدوى الاقتصادية لاستخدام وحدات كبيرة لمعالجة مياه البحر تبدو مشجعة عند استخدام التناضح العكسي فقط . ومن الممكن أن تصبح طريقة التناضح العكسي في المستقبل القريب منافساً خطيراً لطرق التقطير خصوصاً في الأماكن التي لاتتوفر فيها مصادر رخيصة للنفايات الحرارية .

ولقد كانت طريقة الديلزة الكهربائية أول طريقة تطورت تاريخيا ، ومازالت تُعتبر طريقة هامة للآن . وفي هذه الطريقة ، يتم جذب الأيونات المكوِّنة للأملاح من المياه الملحة بقوى كهربائية ، ويتم تركيزها في أماكن مستقلة . وكلما زادت ملوحة المياه ، كلما زادت القدرة الكهربائية اللازمة لعملية الفصل . وتُستخدم هذه الطريقة أساساً لمعالجة الماء الأخضم والذي يحتوي ، في العادة ، على

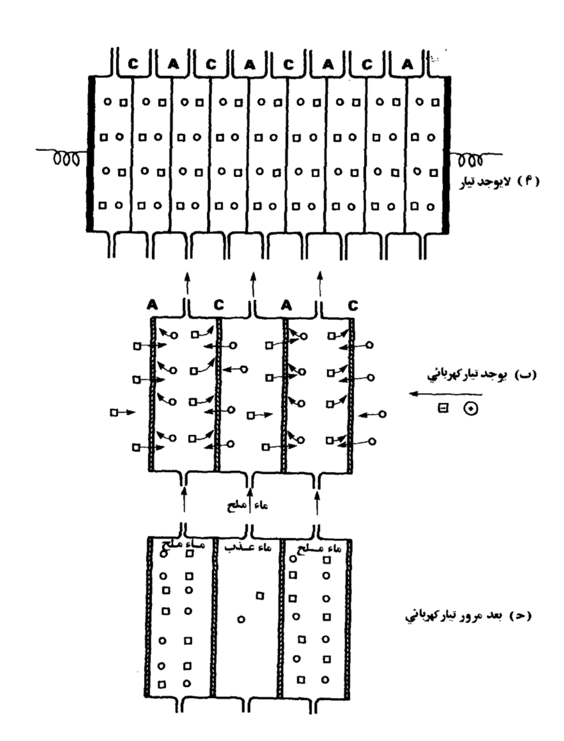
عدة آلاف من الأجزاء من الأملاح الذائبة لكل مليون جزء ، وهذه الملوحة بالطبع مرتفعة نسبيا عن المطلوب للاستخدام المنزلي والصناعي ، ولكنها بالتأكيد مازالت حوالي عُشُر الملوحة المتوسطة لماء البحر .

ويوضح شكل (٦ - ١) الفكرة الرئيسة للديلزة الكهربائية . وتتكون وحدات الديلزة الكهربائية من عدد من الحجيرات الضيقة التي يُضخ الماء الملح خلالها . وتُفصل هذه الحجيرات بعضها عن بعض بوساطة أنواع متبادلة من أغشية خاصة تسمح بنفاذ الأيونات الموجبة (الكاتيونات) أو الأيونات السالبة (الأنيونات) ، على التوالي . وتُحاط حجيرات الأطراف بأقطاب لتمرير تيار مستمر خلال حزمة الحجيرات بأكملها . ويوضح شكل (٦ - ١ أ) حزمة الحجيرات قبل مرور التيار الكهربائي حيث توجد الأملاح في المياه المالحة على هيئة أيونات موجبة وأخرى سالبة .

وبتوصيل القطبين بمصدر تيار مستمر ، تبدأ مسيرة الأيونات وبالتالي سريان التيار الكهربائي خلال الوحدة كما هو موضح بالرسم التخطيطي في شكل (٦ - ١ ب) والذي يُشير إلى بعض حجيرات الحزمة . وكما هو موضح للحجيرة الوسطى ، تسري الأيونات الموجبة من اليمين إلى اليسار ، بينما تسري الأيونات السالبة في الاتجاه المعاكس ، أي يترك كلا النوعين من الأيونات الحجيرة خلال الأغشية . ولو كان الغشاء يسمح بنفاذ كل من نوعي الأيونات لما نتج أي تغير في التركيز لأن كل أيون موجب يترك الحجيرة الوسطى إلى الحجيرة اليسرى يحل مكانه أيون موجب آخر من الحجيرة اليمنى . ولما كان من الممكن بالمثل التخلص من الأيونات السالبة في الحجيرة الوسطى ، لذا كان الغشاء الأيمن للحجيرة غشاءً منفذاً للأنيونات فقط ولايسمح بنفاذ الكاتيونات من الجهة اليمنى إلى الحجيرة الوسطى . وكذا ، فإن الغشاء الأيسر للحجيرة الوسطى هو غشاء منفذ للكاتيونات فقط وبالتالي يحجز الأيونات السالبة في الحجيرة اليسري . ونتيجة لذلك ، ينخفض تركيز الملح في الحجيرة الوسطى ويزداد تركيز الملح في الحجيرات المجاورة كما هو مبين في شكل (٦ - ١ جـ) .

وتتكون وحدات الديلزة الكهربائية عملياً مما يتراوح عدده من عَشر إلى مئات الحجيرات بين زوج واحد من الأقطاب . ونتيجة مرور التيار الكهربائي ، يتكون ماء عذب وآخر ملح في الحجيرات المتجاورة ، أي يمكن القول إن نصف الحجيرات يحوي ماءً ملحاً مركزاً والنصف الآخر يحوي ماءً عذبا (أو منخفض الملوحة) . أما الحجيرات الحاوية للقطبين الكهربائيين فسوف تتلوث بناتج التفاعلات القطبية والتي تحدث نتيجة مرور التيار .

ويمكن شرح النفاذية الانتقائية للأغشية من خلال كونها مواد تبادل أيوني . ففي مثل هذه المواد ، يمكن لكل من الأيونات الموجبة أو السالبة الانتقال خلال الجسم الصلب ، بينما تلتصق



شكل (٦ – ١)

الفكرة الأساسية للديلزة الكهربائية . ○ أيونات موجبة (مثل الصوديوم) ، و □ أيونات سالبة (مثل الكلوريد) ، الرموز C و A تشير إلى الأغشية المنفذة للكاتيونات والأغشية المنفذة للأنيونات ، على التوالي . انتقال الأيونات بسبب وجود تيار كهربائي يؤدي إلى تخفيف تركيز الملح في الحجيرات المتبادلة وزيادة تركيز الملح في الحجيرات المجاورة لها .

الأيونات العكسية الشحنة على الجسم الصلب . وعندما تُوضع هذه الأغشية في محلول ماء ، فإن الكاتيونات تنتقل بسهولة من المحلول خلال هذه الأغشية ولكن بدون إمكانية نفاذ أي من الأيونات السالبة من المحلول المخفف أو من الأيونات الموجبة الزائدة عن التبادل إلى جسم الغشاء . ونتيجة لذلك ، فإن غشاء التبادل الكاتيوني يعمل كحاجز للأيونات السالبة ، ويُمرر التيار الكهربائي خلاله بحركة الأيونات الموجبة التي تدخل إلى الغشاء عند سطحه الأول وتخرج من سطحه الثاني ، ولكن بعد حجز الأيونات السالبة . وبالمثل ، فإن غشاء التبادل الأنيوني يوصل التيار الكهربائي نتيجة حركة الأيونات السالبة .

وتُعتبر أغشية انتقاء الأيونات أكثر الأجزاء حساسية في الوحدة . فهي ، مثل أسطح التبادل الحراري في طرق التقطير ، تُحدد تكلفة الوحدة ، كما أنها أيضا تتسخ بترسيب القشور التي يجب إزالتها ميكانيكيا أو بالإذابة . ومهما كانت هذه الأغشية متينة فإنه يلزم استبدالها بعد فترة . ولقد تضافرت الجهود لإنتاج أغشية مناسبة ، وأثمرت هذه الجهود عن أنواع متنوعة من الأغشية التي تتوفر حاليا بالأسواق بسُمكٍ يتراوح بين أقل من ٠ر١ إلى ١ مم ، وبأشكال تختلف في مظهرها من شكل الأوراق الرقيقة إلى شكل أغطية التبخير الصناعية .

ولقد تم تطبيق طريقة الديلزة الكهربائية على محطات تقدر إنتاجيتها اليومية بآلاف الأطنان من المياه العذبة ، وعلى وحدات منزلية إنتاجيتها أقل من ١٠٠ لتر في اليوم ، بالإضافة إلى وحدات عديدة ذات إنتاجية متوسطة . ولقد تم كثير من التطور والتحسين لنظريات عمليات الانتقال بالتبادل الأيوني في الأغشية . ولقد عُرفت هذه النظريات قبل اكتشاف طريقة الديلزة الكهربائية حيث طبقت في الأغشية الحيوية **biomembranes** التي تطورت كثيرا نتيجة تطور أغشية التبادل الأيوني الصناعية اللازمة خصيصا للديلزة الكهربائية .

وباستخدام الديلزة الكهربائية في محلول ساكن ، تتكون طبقة كبيرة من المحلول المخفف (أو المنزوع الأملاح) بالقرب من أسطح الأغشية ، وهذه الطبقة بالتالي تُمثِّل مقاومة كهربائية كبيرة . وعليه ، يصبح من اللازم ضخ المياه باستمرار من الوحدة . وفي الوحدات العملية التي تستخدم الديلزة الكهربائية ، تُستخدم قواطع بلاستيكية توضع بين الأغشية لتجبر المياه على الحركة في ممر ملتوٍ مما يسبب خلطاً جيداً في كل حجيرة .

ومن الممكن نقل الكمية المطلوبة من الأملاح ، من حجيرة المحلول المخفف إلى حجيرة المحلول المركز ، بتمرير ماء التغذية مرة واحدة في حزمة الحجيرات . وفي هذه الحالة يلزم في العادة استخدام تيار مرتفع ووحدات كبيرة جداً . أضف إلى هذا ، أنه بالتشغيل بهذه الطريقة تنشأ فروق كبيرة في كثافات التيارات الموجودة في الوحدة . فمن أعلى يوجد تركيز منخفض للمحلول وبالتالي توجد

مقاومة كهربائية عالية ، وبالتالي تنخفض قيمة التيار* . أما في الجزء السفلي ، فإن تركيز السوائل في كلتا الحجيرتين متماثل ، وبالتالي تقل المقاومة الكهربائية ، أي ترتفع كثافة التيار . أما إذا استبدلت طريقة التشغيل السابقة بتمرير ماء التغذية على عددٍ متوالٍ من حزم الأغشية التي تُثبَّت منفصلةً أو داخل إطار واحد ، فإن هذه الطريقة تصبح أفضل اقتصاديا وأسهل في التحكم . وفي الوحدات الصغيرة ، يُجمع كل من المحلول المخفف والمحلول المركز ، في بعض الأحيان ، في خزانات منفصلة ويُعاد دورانها خلال حزمة الأغشية عدة مرات حتى تصل درجة إزالة الملوحة إلى الحد المطلوب .

أما القدرة المطلوبة لتشغيل هذه العملية فهى قدرة كهربائية تماماً . ويُمكن تقسيم هذه القدرة إلى قسمين : (١) القدرة المطلوبة للتيار المستمر لنقل الأيونات ، (٢) القدرة المطلوبة للمضخات التي تُدار بالتيار المتردد .

احتياجات القدرة

كما في طرق إزالة الملوحة الأخرى ، فإن الديلزة الكهربائية يلزمها أيضا حد أدنى من الطاقة المتاحة لفصل الماء الخام إلى ماء عذب وآخر ملح . ولقد يبدو ، لأول وهلة ، أن القدر اللازم لهذه الطاقة يمكن اختياره كمقدار صغير وذلك بتمرير تيار كهربائي ضعيف جداً عند جهد اختياري منخفض خلال حزمة الحجيرات . ولكن هذا غير ممكن ، نظراً لضرورة وجود حدٍ أدنى من الجهد الكهربائي اللازم لتمرير التيار في الاتجاه المطلوب . فعندما تتوقف وحدة الديلزة الكهربائية عند أية مرحلة من إزالة الملوحة ، فإنه يُلاحظ وجود فرق جهد كهربائي - بين الأقطاب الكهربائية - معاكس لفرق الجهد الخارجي الموجود على الوحدة . وبطريقة أخرى ، يمكن القول إن الوحدة تعمل عندئذ كبطارية ، إذا ماسحب تيار منها فإن الأيونات تتحرك في اتجاه معاكس لعملية الديلزة الكهربائية ، أي من حجيرات الماء الملح إلى حجيرات الماء العذب حتى يتساوى التركيز مرة أخرى . (تتم هذه العملية بالإضافة إلى الانتشار البطيء للملح خلال الأغشية والذي يميل أيضاً إلى مساواة التركيزات .) فعلى سبيل المثال ، إذا أخذنا حزمة مكونة من ١٠٠ زوج من الأغشية ، تحوى ماءً ملحاً بتركيز ٥٠٠٠ جزء في المليون وماءً عذباً بتركيز ٥٠٠ جزء في المليون ، فإنه يتكون بها فرق جهد كهربائي معاكس قدره ١٢ فولت . وعليه ، فإنه يلزم للقيام بعملية الديلزة الكهربائية استخدام فرق جهد يزيد قليلا عن فرق الجهد المضاد . ويمثل فرق الجهد الكهربائي المستخدم الحد الأدنى لاحتياج القدرة لإزالة الملوحة . ويزيد عملياً فرق الجهد الكهربائي المضاد نتيجة ظاهرة الاستقطاب التي سوف تناقش في جزء لاحق . ويسمى فرق الجهد الكهربائي المضاد بجهد الاستقطاب polarization voltage .

* انخفاض المقاومة الكهربائية في المحلول المركز (نتيجة التركيز المرتفع للملح) لا تُعوِّض الزيادة في المقاومة الكهربائية في حجيرة المحلول المخفف .

وينشأ جهد الاستقطاب الذي نلاحظه عملياً نتيجة لتفاعلات الأقطاب الكهربائية بالإضافة إلى الفرق في التركيز وبعض التفاعلات الجانبية غير المرغوب فيها عند أسطح الغشاء والتي تُسبب جميعها وجود جهد مضاد لمرور التيار . فإذا كان فرق الجهد الكلي المستخدم حوالي من ١ر٠ إلى ٢ر٠ فولت فقط لكل زوج من الأغشية الموجودة بالحزمة ، فإن إزالة الملوحة سوف تتم بمعدل بطيء جدا مما يتطلب وحدات كبيرة جداً . ولتخفيض تكاليف رأس المال ، فلقد ثبت أنه من الأفضل اقتصاديا أن يكون التشغيل عند فرق جهد مرتفع ، أي حوالي ١ فولت لكل زوج من الأغشية ، بالرغم من الفقد في القدرة الكهربائية نتيجة للحركة السريعة للأيونات التي تسبب تحويل جزء كبير نسبياً من الطاقة الكهربائية إلى الطاقة الحرارية .

ويمكن القول إن كلاً من كمية الملح التي تُنقل في الساعة لكل وحدة مساحات من مقطع حزمة الأغشية ولكل وحدة من الماء العذب المنتج في الساعة تتناسب مع كثافة التيار ، i أمبير/سم٢ ، بينما يتناسب استهلاك القدرة الكهربائية (بالوات) مع Ri^2 حيث تمثل R المقاومة الكهربائية للحزمة بالأوم . وبناء عليه ، فإن الطاقة المتاحة لكل كيلوجرام من الملح المنقول تتناسب بالتقريب مع التيار . أو بطريقة أخرى يمكن القول بأنه ، لنوع معين من الماء الخام ، كلما عملت الوحدة أسرع ، كلما ارتفع استهلاك القدرة من التيار المباشر لكل وحدة من وحدات معدل إنتاج الماء العذب . وعليه ، يُصبح من الملائم تعريف دليل القدرة كما يلي :

$$\text{دليل القدرة} = \frac{\text{القدرة الكهربائية (تيار مستمر) لكل وحدة من معدل إنتاج الماء العذب}}{\text{معدل الإنتاج مقسوما على مساحة الغشاء}}$$

وبأخذ معدل إنتاج محسوب لوحدة المساحات من الغشاء يمكن المقارنة بين الوحدات ذات الأحجام المختلفة . وحيث أن كلا من البسط والمقام في معادلة دليل القدرة يتناسب بالتقريب مع التيار ، فإن دليل القدرة يجب ألا يعتمد على فرق الجهد الكهربائي المستخدم ، أو التيار ، أو معدل الإنتاج . وبالرغم من بعض الحيود عن هذا الاستنتاج ، نتيجة التغير في مقاومة الحزمة مع درجة الحرارة ووجود ظاهرة الاستقطاب ، إلا أن دليل القدرة مازال يعتبر معياراً لمقارنة الوحدات المختلفة . فلو ذكر أحد مصنعي وحدات الديلزة الكهربائية أن وحدته تستهلك مقداراً أقل من القدرة لكل متر مكعب من الماء العذب ، فإن هذا لايعني بالضرورة أفضلية وحدته ، لأنه بخفض معدل إنتاج الوحدات الأخرى يمكن الوصول إلى استهلاك أقل للقدرة . وعليه ، يجب إرجاع استهلاك القدرة في الوحدات المختلفة إلى نفس معدل الإنتاج لكل وحدة مساحة للغشاء وهذا بالتمام مايعنيه دليل القدرة . وبالطبع ، يجب أن تتم مثل هذه المقارنة لنفس النوعين من الماء الخام ولنفس درجة الملوحة للناتج نظراً لأنه في الديلزة الكهربائية – بخلاف طرق التقطير الأخرى – تتغير احتياجات القدرة تغيراً كبيرا مع تركيز الأملاح .

ولمقارنة أداء وحدات لها درجات مختلفة لخفض الملوحة ، فإنه من المفيد حساب دليل القدرة لكل ١٠٠٠ جزء ملح مزال في المليون (مثل كلوريد الصوديوم) . وتُعطي قيمة الدليل مقياساً لكمية الطاقة الكهربائية (تيار مستمر) لكل وحدة من معدل الملح المزال بكل وحدة من سطح الغشاء . وتُصبح هذه المقارنة ذات مغزى فقط إذا لم يكن هناك اختلاف كبير في قيم ملوحة المياه التي ستقارن بعضها ببعض ، لأن زيادة تخفيف المحلول تزيد احتياج القدرة الكهربائية لنقل كمية معينة من الملح لكل وحدة زمن . (هذا نتيجة أن الجهد الكهربائي اللازم لسريان الأيونات يرتفع كلما كان المحلول أكثر تخفيفا .) فمثلا ، يتطلب خفض تركيز الملح من ١٣٠٠ إلى ٣٠٠ جزء في المليون قدرة كهربائية أكبر نسبياً من القدرة المطلوبة لخفض التركيز من ٤٠٠٠ إلى ٣٠٠٠ جزء في المليون ، بالرغم من أنه في كلتا الحالتين يخفض التركيز بمقدار ١٠٠٠ .

وتتراوح قيمة دليل القدرة في الوحدات العملية مابين ١٠ و ٥٠ وات (ساعة^{٢}) (قدم^{٢}) (جالون$^{-٢}$) ، ولكن عندما ترجع هذه القيمة إلى نفس القيمة من الملح المنزوع (أي إلى ١٠٠٠ جزء ملح – مثل كلوريد الصوديوم في المليون) فإنها تنخفض إلى القيمة ١٠ في معظم الأحوال . ويزيد متوسط كثافة التيار الكهربائي مع زيادة ملوحة المياه . وتُقدر قيمة هذه الكثافة عادة بحوالي ١٠٠ أمبير لكل متر مربع (١٠ مِلّيأمبير لكل سنتيمتر مربع) من سطح الغشاء . وقد يكون من المفيد مقارنة هذه القيم لكثافة التيار الكهربائي مع القيم المستخدمة في الأجهزة الكهربائية الكيمائية التقليدية ، مثل خلايا الإلكتروليت لإنتاج الكلور القِلْوي ، ولتخزين البطاريات المستخدمة في السيارات . ففي جميع هذه الأجهزة – والتي تحتوي جميعها على محاليل أكثر تركيزا – من الموجود في الديلزة الكهربائية – تعادل كثافة التيار الكهربائي حوالي من ضعف إلى ثلاثة أضعاف الكثافة الموجودة في الديلزة الكهربائية . وتُؤكد هذه الحقيقة أن مساحات الأغشية المطلوبة لنقل الأيونات بمعدل ما ، أكبر بكثير من أسطح الأقطاب الكهربائية المعدنية في الأجهزة التقليدية والتي تنتج معدلا مماثلا من تفاعل كهربائي كيميائي . وعليه ، تتطلب الديلزة الكهربائية مساحات كبيرة نسبيا من الأغشية ، وبالطبع فإن تكلفة (وحدة المساحة) هذه الأغشية هامة جدا لاقتصاديات هذه العملية .

ويُشير دليل القدرة إلى احتياجات التيار المستمر فقط . وتتطلب عملية الديلزة الكهربائية مقداراً آخر من القدرة اللازمة للضخ ولأجهزة القياس والتحكم . ويعتمد مقدار هذه القدرة على تصميم الوحدات وبالخصوص على نوع الفواصل المستخدمة . ومعظم أنواع الفواصل يجبر تيارات الماء على المرور في ممرات ملتوية مسبباً خلطاً جيدا لخفض الاستقطاب ، ولكنها تتطلب مقداراً كبيراً من القدرة للضخ . أما في معظم المحطات التي تعمل حالياً ، فإن احتياجات القدرة الكلية تتراوح من مرة ونصف إلى ضعف مقدار احتياج القدرة من التيار المستمر للديلزة الكهربائية بمفردها .

الأداء الأمثل للمحطة

عندما يتطلب الأمر تحديد أفضل وضع اقتصادي لظروف تشغيل محطة ديلزة كهربائية ، فإنه يجب أن نختار أحد البديلين الآتيين : هل من المفضل (١) استخدام عدد قليل من حزم الأغشية وتشغيلها عند معدل الإنتاج الأقصى ، أو (٢) استخدام عدد كبير من حزم الأغشية وتشغيلها في وضع متواز عند معدل أقل من المعدل الأقصى للإنتاج ؟ في الحالة الأولى ، ينخفض كل من رأس المال وعائده بينما ترتفع تكاليف القدرة ، أما في الحالة الثانية فيحدث العكس .

ويمكن تحديد أفضل حجم اقتصادي للمحطة ولاستهلاك القدرة لمعدل ما من إنتاج الماء العذب (متر مكعب/يوم) ولدرجة ملوحة معينة للماء الخام وللماء العذب ، باستخدام التحليلات التقريبية الآتية .

تحدد التكلفة الكلية لمقدار الوحدة من الماء العذب المنتج بالرمز d الذي يعادل مجموع حدود ثلاثة كمايلي :

$$d = ai + (b/i) + c$$

حيث a و b و c ثوابت بينما i تمثل كثافة التيار . ويمثل الحد الأول في العلاقة السابقة النفقات التي تتناسب مع معدل الإنتاج ، وهى أساساً استهلاك القدرة الكهربائية التي تتناسب بالتقريب مع كثافة التيار . وتنقسم القدرة الكهربائية إلى قدرة الديلزة الكهربائية بالتيار المستمر وقدرة الضخ . وتُحسب كل النفقات المذكورة لمقدار الوحدة من الناتج . ويُمثل الحد الثاني من المعادلة النفقات التي تتناسب مع عدد الحزم ، أي عائد رأس المال والتأمين ، والنفقات الأخرى المماثلة . وهذه النفقات تتناسب عكسياً مع معدل الإنتاج إذ يقل رأس المال لكل متر مكعب بزيادة الإنتاج اليومي لمحطة ما . أما الحد الثالث في المعادلة فلا يعتمد على كثافة التيار ويشمل تكاليف المعالجة الكيميائية والنفقات الأخرى التي لاتعتمد على عدد الحزم المستخدم .

ولإيجاد أفضل كثافة للتيار ، تُفاضل المعادلة بالنسبة إلى i ويعادل التفاضل بالصفر . وعليه تصبح أفضل كثافة للتيار :

$$i_{opt} = \sqrt{(b/a)}$$

وبالتعويض بهذه القيمة في المعادلة الأساسية ، وُجد أنه للوصول إلى أفضل تشغيل اقتصادي ، فإنه يلزم تساوي الحدين الأول والثاني . وبطريقة أخرى يلزم اختيار عدد الوحدات بحيث تتساوى

التكاليف السنوية للقدرة مع المجموع السنوي لعائد رأس المال والتأمين والنفقات الأخرى الثابتة* .

وعادة ما تقع كثافة التيار المستخدم لإزالة ملوحة الماء الأخضم ، الذي يحتوى على ملوحة قد تصل إلى ٥٠٠٠ جزء من المواد المذابة في المليون ، مابين ٦ إلى ٢٠ ملّيأمبير . سم$^{-2}$ (أي حوالي ٥٫٦ – ١٨٫٦ أمبير/قدم^{2}) .

الأغشيـــة

للأغشية نصيب هام في حسابات التكاليف نظراً لقصر عمرها عموماً بالمقارنة بعمر المحطة . ومن غير الممكن إدخال نفقات استهلاك ثمنها في أي من الحدود الثلاثة في معادلة التكاليف السابقة . ويُمكن أخذ تكاليف استبدال الأغشية ضمن الثابت b مثل تكاليف باقي المعدات إذا لم يعتمد عمر الغشاء على كثافة التيار بعد إجراء تعديل مناسب للعمر القصير للغشاء . ولكن هذا غير ممكن إذ يتناقص عمر الغشاء عموماً بسرعة مع زيادة كثافة التيار . وبناء على ذلك ، تتساوى تكاليف استبدال الأغشية لكل وحدة من الماء المنتج لحزمة تعمل عند أقصى كثافة تيار ولحزمتين لهما نصف تلك الكثافة للتيار . وفي هذه الحالة ، تؤخذ تكاليف استبدال الغشاء ضمن الثابت c .

ويُعتبر استبدال الغشاء بنداً رئيساً في تكلفة الديلزة الكهربائية للمياه . ومن الصعب جداً وضع تقدير دقيق لعمر غشاء ما باختباره معملياً فقط .

ويوجد حالياً عدد كبير من أغشية التبادل الأيوني . وكثير من هذه الأغشية مُقوًّى بألياف قوية تُصنع في الغالب من الزجاج أو من أنسجة الدَّيْنل **Dynel**** للحصول على المتانة الميكانيكية اللازمة لتحمل فرق الضغط بين حجيرات الديلزة الكهربائية .

ويوضح الملحق (٥ أ) عدة مميزات هامة للأغشية . ويقوم مصمم المحطة باختيار أفضل غشاء اقتصاديا لاستخدام ما . ولكن ، يُراعي أن كثيراً من مصممي المحطات يقومون أيضا بتصنيع الأغشية ، وبالتالي يميلون إلى استخدام الأغشية التي يصنعونها والتي يعرفون أداءها جيدا .

---

* هذه النتيجة لاتصلح للديلزة الكهربائية فقط وإنما تصلح لأية عملية ذات سريان مناسب (في هذه الحالة يكون سريان الأيونات ممثلا بكثافة التيار الكهربائي) يتناسب مع القوة المعنية (في هذه الحالة الجهد الكهربائي المستخدم) . فعلى سبيل المثال ، في التناضح العكسي (انظر فصل ٩) يتناسب السريان الناتج مع الضغط المستخدم . وللمظهر العام لقانون الجذر التربيعي **square root law** (قانون كيلفن **Kelvin's law**) يمكن للقارىء الرجوع إلى المراجع في تطبيقات الديناميكة الحرارية غير المستقرة (انظر مراجع الفصل الثالث ومرجع جرانت وأيرسون **Grant and Ireson** في مراجع هذا الفصل) .

** تنتج الدنيل شركة يونيون كربيد آند كربون **Union Carbide and Carbon Corp.** بنيويورك .

والقاعدة الأساسية أن تتكون الأغشية من سُمْكٍ بضع طبقات جزيئية حتى يتسنى لها العمل كمرشحات للأيونات إذ توجد بعض الدلالات على أن الأغشية الرقيقة جداً الموضوعة في مواد عضوية حية يمكنها القيام بهذه المهمة . ولكن المتانة الميكانيكية تستلزم تجنب استخدام أغشية رقيقة جداً في محطات الديلزة الكهربائية . ويُمكن الحصول على خواص ميكانيكية معقولة باستخدام أغشية بسمك من ١ر٠ إلى ٠ر١ مم .

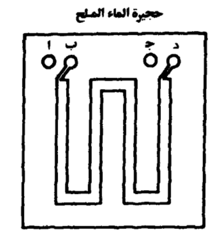
ويعتمد ثمن الأغشية على خواصها ومتانتها . وجميع الأغشية المستخدمة حاليا تُنتج بكميات محدودة ، وبالتالي مرتفعة التكاليف نسبيا . والأسعار الحالية لأنواع منتقاة من الأغشية المتينة لمحطات صغيرة (١٠ – ١٠٠ متر مكعب/يوم) في حدود من ٤٠ إلى ٥٠ دولار/متر مربع . والمتوقع انخفاض الأسعار إذا ما كان هناك إنتاج كبير لهذه الأغشية .

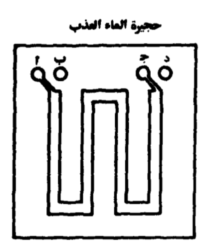
الفواصـــــل

تُوضع في العادة الفواصل بين الأغشية للمحافظة على مسافات ثابتة بين الأغشية وبعضها البعض ولتوجيه سريان السوائل في ممرات ملتوية لتحسين الخلط . وفي الوحدات العملية للديلزة الكهربائية ، تكون حجيرات السائل ضيقة جدا في العادة ، وتكون المسافة بين أغشية تبادل الكاتيونات والأنيونات حوالي ١ مم . ويمثل هذا السمك التوازن مابين تبديد القدرة الكهربائية بالتيار المستمر (حرارة جول) ، واحتياجات قدرة الضخ إذ تزيد الأولى وتنقص الثانية على التوالي بزيادة سمك الحجيرات . ونظراً لضيق الحجيرات الشديد فإنه من الجلي استحالة تغذية وتفريغ كل حجيرة بأنابيب منفصلة تصل إلى المجرى الرئيس .

وللتغلب على هذه المشكلة ، تم تصميم فواصل تعمل على توصيل وتوزيع السوائل . ويُوضح شكل (٦ – ٢) هذه الفكرة ، حيث يعرض الشكل فواصل لحجيرات الماء العذب والماء الملح في مستوى موازٍ للأغشية . وتُصنع الفواصل من ألواح من البلاستيك بسمك يساوي السمك المطلوب للخلية . وتوجد ٤ ثقوب هم أ و ب و جـ و د في كل فاصل . هذه الثقوب الأربعة توافق الثقوب المناظرة في كل غشاء وفي الأقطاب . كما يوجد مجرى ملتوٍ للسوائل في كل فاصل . ويتماثل كل من نوعي الفواصل كلياً – فيما عدا وصلات ممر السائل – للثقوب أ و ب أو جـ و د على التوالي . وعند وضع الطبقات المتبادلة من الفواصل والأغشية أحدهما فوق الآخر تُضغط جيدا ، لتُكوِّن الثقوب معاً مجاري للسائل .

ويدخل ماء التغذية إلى حجيرات الماء العذب من خلال المجرى أ ولكن لايمكنه دخول حجيرات الماء الملح . ويتكون ماء التغذية من ماء خام أو ماء مسترجع منزوع الملوحة جزئياً .





شكل (٦ – ٢)

فواصل وحدات الديلزة الكهربائية . فكرة نظام توزيع السائل .

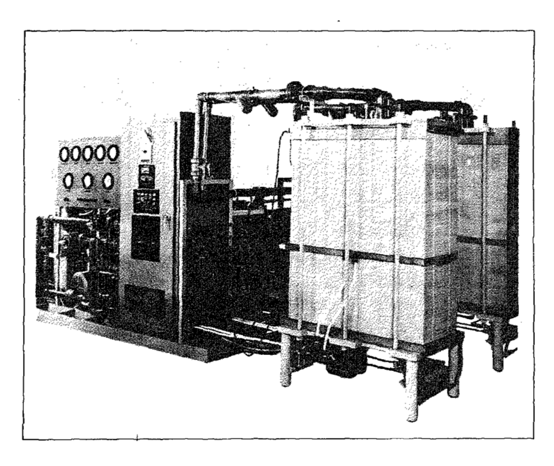
وبالمثل ، يدخل ماء التغذية إلى حجيرات الماء الملح خلال المجرى ب . ويترك الماء المنزوع الملوحة والماء الملح الحجيرات من المجاري المنفصلة جـ و د على التوالي .

وتستعمل جميع الوحدات العملية هذا النظام أو نظاماً مماثلًا للتوزيع . وفي وحدات كثيرة ، يحتوى الجزء المركزي للحجيرة على شبكة من البلاستيك تعمل لنفس الغرض مثل الممر الملتوي الموضح في شكل (٦ – ٢) .

ويُوضح شكل (٦ – ٣) حزمة من الأغشية المجمعة .

الأقطـــاب

يُستخدم العديد من المواد في تصنيع الأقطاب . وتتلف الأقطاب الموجبة بمعدل أسرع بكثير من الأقطاب السالبة نتيجة للتآكل بالأكسجين والكلوريد المتكوِّن على الأقطاب الموجبة . وهناك ميل لاستخدام أقطاب مغلفة بالبلاتين ، وهو مقاوم جيد (مثل التيتانيوم المغلف) – بالرغم من ارتفاع التكاليف . ولكن نظراً لكون طبقة التغليف بالبلاتين رقيقة جدا ، ونظرا لأن كل زوج من الأقطاب يخدم مئات الأغشية ، لذا فإن ارتفاع الثمن لايمثل مشكلة كبيرة . وبالرغم من أن هذا التغليف لازم فقط لحماية القطب الموجب ، إلا أن التغليف يتم أيضا للقطب السالب نظراً لأنه في كثير من الوحدات يُعكَس اتجاه التيار من آن لآخر للتغلب على تأثيرات الاستقطاب ولإزالة القشور المترسبة .



شكل (٦ - ٣)

وحدة ديلزة كهربائية . يوضح الشكل حزمة الأغشية والمعدات المساعدة . وتنتج مثل هذه الوحدة حوالي ٤٠٠ متر مكعب (١٠٠٠٠٠ جالون) يوميا من المياه العذبة من الماء الأجاج المستخدم للتغذية في جزيرة كورفيو باليونان . تُعكَس القطبية الكهربائية للتحكم المستمر في تكوّن القشور . بإذنٍ من شركة إيونكس . واتر داون بولاية ماساتشوستس .

الاستقطاب والتقشر

هناك حد أقصى لكثافة التيار التي يمكن استخدامها في وحدات الديلزة الكهربائية . ويعتمد هذا الحد أساساً على تركيب الماء المستخدم في الوحدة ، وسرعة السريان ، وتصميم الفواصل . وينتج هذا الحد نتيجة لظاهرة الاستقطاب . وتعرف ظاهرة الاستقطاب في تقنية الديلزة الكهربائية بأنها التأثيرات الناتجة عن زيادة ونقص تركيز الملح بالقرب من أسطح الأغشية نتيجة مرور التيار . وفي معظم الأحيان تحدث هذه الظاهرة أيضا بسبب تفاعلات الأقطاب .

وكما هو موضح في شكل (٦ - ٤) ، يرتفع التركيز الأيوني بالقرب من أسطح الأغشية التي في اتجاه حجيرات الماء الملح . وعلى العكس ، ينخفض تركيز الأيونات على الأسطح المناظرة المواجهة

لحجيرات الماء العذب . وبناء على ذلك ، يختلف تركيز الملح بالقرب من الأغشية عن التركيز في مركز حجيرات الماء العذب والماء الملح ، على التوالي . وينتج عن هذا التأثيرات الثلاثة الآتية :

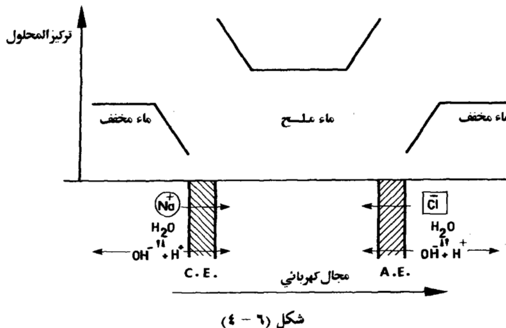
١ – زيادة مقاومة الحزمة مما يسبب فقداً في القدرة .
٢ – تكون القشور على الأغشية .
٣ – تغيرات ملحوظة في قيمة الأس الهيدروجيني في الماء الملح والماء العذب ، ويحدث هذا فقط عند كثافة مرتفعة للتيار .

وتنتج الزيادة في المقاومة نتيجة أن نقص المقاومة على وجه الغشاء من جهة الماء الملح – بسبب زيادة التركيز – لايعوِّض الزيادة في المقاومة على الوجه الآخر للغشاء . ويظهر هذا التأثير جلياً عند الكثافات المرتفعة للتيار أو عند معدلات السريان المنخفضة ، عندما يكون معدل الخلط المضطرب غير كافٍ لجعل طبقات التركيز المرتفع والتركيز المنخفض للملح أضيق ماتكون . وفي الواقع ، فإنه للإبقاء على كثافة التيار ثابتة في الحزمة ، بينما يُخفَّض معدل السريان ، فإننا نصل إلى نقطة حيث تزيد مقاومة الحزمة فجأة . وتسمى هذه السرعة بالسرعة الحرجة عند الكثافة المستخدمة للتيار .

ومن الممكن أن تُسبب زيادة تركيز الملح بالقرب من سطح الغشاء المواجه للماء الملح ، ترسب القشور إذا ما تعدى التركيز حدود الذوبانية . ومن المعتاد ، ترسب كربونات الكالسيوم وهيدروكسيد المغنسيوم على غشاء التبادل الأيوني من جهة الماء الملح . وفي إحدى المحطات في ويلكوم بجنوب أفريقيا ، حيث تستخدم مياه تحتوي على كميات ضئيلة من أملاح الباريوم والاسترانشيوم ، وجدت قشور من كبريتات هذه العناصر مترسبة على سطح غشاء التبادل الكاتيوني من جهة الماء الملح . ومن المعتاد ، في الديلزة الكهربائية لمياه البحر وجود قشور كبريتات الكالسيوم .

وأخيرا ، فإن تغيُّر قيمة الأس الهيدروجيني يمكن تفسيره بأنه نتيجة انتقال أيونات الهيدروجين والهيدروكسيد خلال أغشية التبادل الأنيوني والكاتيوني ، على التوالي . وعندما ينخفض تركيز الملح بشدة ، عند أسطح الأغشية المواجهة للماء العذب ويثبت التيار أوتوماتيكيا ، تشترك أيونات الهيدروجين والهيدروكسيد في انتقال التيار . وينتج عن التوليد الحمضي – القاعدي **acid-base generation** الموضح في شكل (٦ – ٤) بيئة قِلْوية عند سطح غشاء التبادل الأنيوني المواجه للماء الملح والذي يُفضل ترسيب كربونات الكالسيوم وهيدروكسيد المغنسيوم .

ويُسبب تَكوُّن القشور الصلبة التي تلتصق بالأغشية زيادة المقاومة الكهربائية ومقاومة السريان ، وبالتالي يُسبب الفقد في القدرة ، وفي بعض الأحيان تلف الغشاء ميكانيكيا . وبينما يظهر تَكوُّن القشور واضحاً عند الكثافات المرتفعة للتيار ، فإنها تتكون أيضاً عند الكثافات المنخفضة



شكل (٦ - ٤)

ظاهرة الاستقطاب في الديلزة الكهربائية . يمثل النصف السفلي للرسم انتقال الأيونات خلال أغشية التبادل الأنيوني (A.E.) والتبادل الكاتيوني (C.E.) وتوليد الحمض والقلوي . ويُمثل النصف العلوي للرسم منحنى تركيز الملح في حالة الاستقرار . عن شبيجلر Spiegler (١٩٦٨) .

للتيار ، بالرغم من انخفاض كمية القشور المتكونة لوحدة الناتج . ولمنع تَكوُّن كربونات الكالسيوم ، يُضاف حمض الهيدروكلوريك وحمض الكبريتيك في الغالب إلى الماء الملح ، وأيضا إلى سائل شطف حجيرة القطب السالب ، حيث تتكون أيونات الهيدروكسيد بتفاعلات الأقطاب . وتعتمد كمية الحمض المطلوبة على قِلْوية الماء الخام . فعلى سبيل المثال ، تَستخدِم المحطة الموجودة في كولنجا بكاليفورنيا ماءً خاماً بِقلوية ١٤٠ جزء في المليون (بدلالة $CaCO_3$) ، وتُعطي جرعة من حمض الكبريتيك قدرها ٢٤٠ جرام لكل متر مكعب من الماء العذب الناتج (أي ٢ رطل/١٠٠٠ جالون أمريكي) . ولقد ثبت أن إضافة كميات صغيرة من مِتافوسفات الصوديوم السداسية sodium hexametaphosphate (بتركيز ضئيل يصل إلى بضع أجزاء في المليون) مفيدة في منع ترسب القشور في الوحدة . وتُضاف تكاليف الحمض والمتافوسفات السداسية إلى تكلفة معالجة الماء .

ومن أهم عيوب الحقن بالحمض ضرورة استخدام معدات غير قابلة للصدأ ، بالإضافة الى الخطورة في استعماله ، لذا فهناك العديد من المحاولات لتشغيل الوحدات مع منع تكون القشور بدون استخدام الحقن بالحمض . فمثلا ، العكس الدوري لقطبية القطبين يؤدي في الغالب إلى ذوبان القشور ، ولكن في هذه الحالة ، تصبح حجيرات الماء الملح حجيرات للماء العذب والعكس صحيح . لذا يلزم التغير الآلي لتوصيل السريان إذا ما انعكس التيار .

ويجب معالجة المياه التي تحتوي على مواد صلبة غروانية وخشنة أولياً بالترشيح أو بالتَدمُّج (اي اندماج الدقائق المترسبة) . وإذا لم يتم هذا فسوف يتكوَّن في الحال ترسيب على الغشاء مما يؤدي إلى مشاكل وصعوبات مماثلة لتلك التي تحدث مع الأنواع الأخرى للقشور .

مصدر القدرة الكهربائية

يتم الحصول في العادة على التيار المستمر اللازم لوحدة الديلزة الكهربائية في الموقع باستخدام محول من التيار المتردد إلى التيار المستمر بكفاءة تحويل حوالي ٩٠٪ . وفي الوحدات التي لاتحتوي على دوران للماء المخفف ، والتي تعمل عند معدل إنتاج ثابت ، يلزم المحافظة على ثبات التيار حتى يمكن تثبيت معدل نقل الملح . وعليه ، يزداد فرق الجهد الكهربائي بالتدريج إذا ماترسبت القشور . وبالطبع فإن تكاليف أجهزة التحكم لتثبيت التيار تضاف إلى ثمن الوحدة .

أما في أنظمة استرجاع المحلول المخفف (أي دورانه) فلا يلزم في الغالب تثبيت التيار . ويُمكن لهذه الأنظمة العمل عند فرق جهد كهربائي ثابت . ومع استمرار عملية تشغيل الوحدة ، ينخفض كلٌ من التيار ومعدل نقل الملح حتى تتم تغذية دفعة جديدة من الماء الخام :

تقويم مقارن للوحدات

بالرغم من أن وحدات الديلزة الكهربائية لم تظهر في الأسواق إلا في بداية الخمسينات ، إلا أنه توجد حالياً أنواع كثيرة من الوحدات ذات التصميمات المختلفة . ولقد تطورت الوحدات الصغيرة التي تُنتج مابين ٥٠ و ١٠٠ لتر من الماء العذب يومياً . وتستهلك هذه الوحدات مايُعادل أقل من ٦٠ وات ويمكن تعليقها فوق حوض المطبخ بعد توصيلها بخط المياه المنزلية مباشرة . كما تطورت أيضاً وحدات أخرى صغيرة وبسيطة نسبياً للاستخدام في المزارع النائية أو للمنازل التي بها مصدر مياه ملحة ويتوفر بها مصدر كهربائي .

وبالرغم من تشغيل الكثير من وحدات تنقية مياه البحر بالديلزة الكهربائية إلا أن هذه الطريقة لم تُثبت بعد اقتصاديتها لإنتاج الماء العذب من مياه مرتفعة الملوحة إلا في بعض الحالات الخاصة . فعلى سبيل المثال توجد محطتان للديلزة الكهربائية ، إحداهما تستخدم مياه البحر الأسود (١٧٧٠٠ جزء من المواد الصلبة المذابة في المليون) والأخرى محطة يابانية . وتعمل كلتا المحطتين على السفن . وهناك بعض الأبحاث التي تُجرى حاليا لخفض مقاومة الحزمة بزيادة درجة حرارة الماء (حتى ٧٠ درجة مئوية) وبتخفيض سمك حجيرات الماء ، مما يعطي بارقة أمل في خفض التكاليف مستقبلا .

مراجع مختـــارة

مرجع عام عن الكيمياء الكهربائية التطبيقية

General Reference On Applied Electrochemistry

Bockris, J.O.M., and Reddy, A.K.N., *Modern Electro-Chemistry,* 2 Vols., Plenum/Rosetta, New York, 1973.

مراجعـــات **Reviews**

Solt, G.S., "Electrodialysis," *Membrane Separation Processes,* P. Meares, ed., Elsevier, Amsterdam, 1976.

Lacey, R.E., and Loeb, S., eds., *Industrial Processing with Membranes,* Chapters 1-3, Wiley, New York, 1972.

Wilson, J.R., ed., *Demineralization by Electrodialysis,* Butterworths, London, 1960.

Spiegler, K.S., "Electrodialysis," *Chemical Engineer's Handbook,* 5th ed., R.H. Perry and C.H. Chilton, eds., McGraw-Hill, New York, 1973. Chapter 17, P.52.

Passino, R., ed., *Biological and Artificial Membranes and Desalination of Water,* Elsevier, Amsterdam, 1976.

بحوث لمواضيع علمية نوقشت في هذا الفصل

Papers on Specific Aspects Discussed in This Chapter

Belfort, G., and Guter, G.A., "An Electrical Analogue for Electrodialysis," *Desalination* 5:267 (1968).

Belfort, G., and Guter, G.A., "An Experimental Study of Electrodialysis Hydrodynamics," *Desalination* 10:221 (1972).

Forgacs, Ch., Ishibashi, N., Leibovitz, J., Sinkovic, J., and Spiegler, K.S., "Polarization at Ion-Exchange Membranes in Electrodialysis," *Desalination* 10:181 (1972).

Forgacs, Ch., Koslowsky, L., and Rabinowitz, J., "The Desalination of Sea Water by High-Temperature Electrodialysis," *Desalination* 5:349 (1968).

McRae, W.A., Glass, W., Leitz, F.B., Clarke, J.T., and Alexander, S.S., "Recent

Developments in Electro-dialysis at Elevated Temperatures," *Desalination* 4:236 (1968).

Orjerovsky, M., "First Industrial Installation of Electrochemical Desalting of Sea Water," *Proceedings of the Symposium on Salt Water Conversion,* Union Institute for Water Supply, Canalization, Hydrotechnics and Engineering Hydrogeology, Academy of Building and Architecture, Moscow, 1959. In Russian, describes electrodialysis of Black Sea water.

Tsunoda, Y., and Kato, M., "Compact Apparatus for Sea-Water Desalination by Electrolysis Using Ion-Exchange Membranes," *Desalination* 3:66 (1967).

Grant, E.L., and Ireson, W.G., *Principles of Engineering Economy,* 4th ed., Ronald Press, New York, 1964. A discussion of economic optimization, by weighing investment costs against electric power costs (Kelvin's law) starts on p.224.

٧ إزالة ملوحة المياه بالتجميد

■ الفكرة الأساسية ■ التجميد المباشر ■ التجميد غير المباشر ■ متطلبات القدرة
■ غسل الثلج ■ عملية التميؤ ■ مراجع مختارة

الفكرة الأساسية

تعتمد عملية إزالة ملوحة المياه بالتجميد على الحقيقة الثابتة أن بلورات الثلج المتكونة بتبريد ماء ملح تكون خالية من الملح ، مما يجعل هناك تشابها بين هذه العملية وعملية التقطير التي تنتج بخاراً خالياً من الأملاح من محلول من الماء الملح . هذا التشابه يظهر فقط من ناحية خلو الناتج في كلتا العمليتين من الأملاح ولكنهما بالطبع يختلفان من الناحية العملية حيث تتم عملية التقطير عند درجة حرارة أعلى من الدرجة المحيطة بينما تتم عملية التجميد عند درجة حرارة أقل من الدرجة المحيطة . هذا الاختلاف في درجة حرارة التشغيل ، في كلتا العمليتين ، يؤثر على تصميم الأجهزة والمعدات الخاصة بكل عملية ، إذ يُراعي في تصميم عملية التقطير تقليل كمية الحرارة المفقودة من وحدة التقطير إلى الجو المحيط ، بينما يراعي في تصميم عملية إزالة الملوحة بالتجميد التقليل من كمية الحرارة المكتسبة بوحدة التجميد من الجو المحيط . وأهم عيوب إزالة ملوحة المياه بالتجميد هي المشاكل الناجمة عن نقل وتنقية الثلج ، وأهم مميزاتها التقليل من الترسب والتآكل إذ يتم التشغيل عند درجات حرارة منخفضة نسبيا .

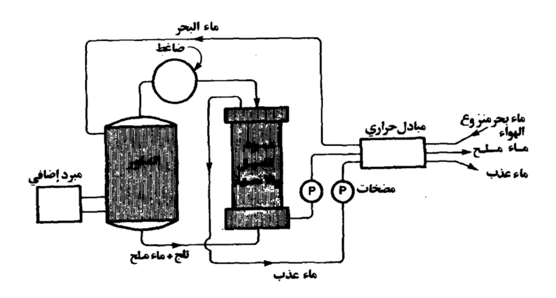
وتعتمد عملية إزالة ملوحة المياه بالتجميد – وتصميم معداتها – على القواعد الأساسية المعروفة والأجهزة الخاصة بتقنية التبريد ، ولكن بعد تعديلها لتناسب إزالة ملوحة المياه بالتجميد .

وتنقسم عملية إزالة ملوحة المياه بالتجميد إلى طريقتين : التجميد المباشر والتجميد غير المباشر . وتستخدم طريقة التجميد المباشر الماءَ كمُبرِّد refrigerant حيث يُبخَّر الماء عند درجات حرارة منخفضة وتُسحب الحرارة اللازمة للتبخير من باقي الماء مما يسبب تبريده وتكوين ثلج . أما طريقة التجميد غير المباشر فتستخدم مائعاً شديد التطاير – مثل البيوتان – كمبرد . ويمرر البيوتان

في الماء الملح لتبريده . ونظراً لأن البيوتان لايقبل الذوبان في الماء ، فإنه لا داعي لوجود مبادل حراري للفصل بين البيوتان والماء . وتعتبر عملية التميؤ عملية مشابهة لإزالة ملوحة المياه بالتجميد غير المباشر ، ولكن بصورة أخرى ، إذ تعتمد طريقة التميؤ على تكوين بلورات صلبة من المادة المبردة والماء بدلا من بلورات الثلج .

التجميد المباشر

يُبيِّن شكل (٧ — ١) الفكرة الأساسية لعملية التجميد المباشر والذي يُعرف بعملية زارشين Zarchin process (أيضا يعرف بعملية التفريغ والتبخير الفجائي vacuum-flash process) . ولقد تم إجراء الكثير من التعديلات على هذه الطريقة بشركة كولت إندستريز Colt Industries بمدينة بلويت بولاية ويسكونسون الأمريكية . وفي هذه العملية ، يدخل ماء البحر بعد تبريده في المبادل الحراري إلى برج التجميد (المبلور crystallizer) حيث يكون الضغط داخل البرج مابين ٣ و ٤ مم زئبق (حوالي ٠٠٥ر٠ ضغط جوي) مما يسبب التبخير الفجائي لجزء من ماء البحر . وتسحب الحرارة اللازمة للتبخير من الجزء المتبقي من ماء البحر ، مما يسبب تجميد هذا الجزء (درجة التجميد حوالي — ٩ر١ درجة مئوية لماء البحر النقي وحوالي — ٨ر٣ درجة مئوية لماء البحر ذي التركيز



شكل (٧ — ١)

رسم تخطيطي لعملية التجميد المباشر مع ضغط البخار . يتبخر ماء البحر البارد في المُبلور عند ضغط منخفض جدا . ويتكون الثلج ثم يذهب إلى عمود الغسيل والانصهار حيث يلامس سرياناً معاكساً من البخار المضغوط مما يُصهر الثلج إلى ماء عذب . ويستخدم المبرد الإضافي للمحافظة على الاتزان الحراري . بإذن من شركة كولت إندستريز بولاية ميتشجان .

ضعف التركيز العادي) . وتُعطِي المجمدات الحديثة معدلات بلورة في حدود من ١ إلى ٥ر١ طن من الثلج لكل ساعة ولكل متر مكعب من حجم المبلور .

ومن دراسة احتياجات الطاقة الحرارية ، يتضح أن إزالة ملوحة المياه بالتجميد تحتاج إلى حوالي ٨٠ سعرا حرارياً لإنتاج كيلو جرام واحد من الثلج ، بينما تحتاج إزالة ملوحة المياه بالتبخير إلى حوالي ٦٠٠ سعر حراري لإنتاج كيلو جرام واحد من البخار . وعليه ، فإن الحرارة المستخدمة لإنتاج كيلو جرام واحد من البخار تكفي لإنتاج ٥ر٧ كيلو جرام من الثلج . ولكن يُراعي في حالة الإعذاب بالتجميد ضرورة غسل الثلج الناتج للتخلص من الأملاح الدقيقة المصحوبة مع البلورات ، والتي قد تمثل ٥٠٪ من وزن البلورات .

وتُعتبر طريقة غسل الثلج بتمريره عكس تيار من ماء الغسيل يسري إلى أسفل ، من أكفأ الطرق لغسل البلورات من الملح إذ تُفقد كمية محدودة جداً من المياه العذبة أثناء عملية الغسيل . ويُوجد حالياً أعمدة غسيل ذات كفاءة عالية وحجم صغير ، حيث تتم عملية الغسيل في عمود ذي ضغط عالٍ نسبياً ومغمور كليا بالسائل . ويتم سريان كل من الماء الملح المركز والماء العذب خلال مبادل حراري لتبريد ماء البحر مبدئياً .

ويُراعي في تشغيل وحدة إعذاب المياه بالتجميد الإبقاء على ضغط أقل من الضغط الجوي في المبلور مما يستلزم ضخاً مستمراً لبخار الماء الناتج من التبخير ، حتى لايتساوى ضغط المبلور بضغط بخار الماء الملح مما يُوقف عملية التبخير وبالتالي يوقف إنتاج الثلج . ولهذا السبب ، تحتوي وحدة إزالة الملوحة على ضاغط لإزالة البخار من المبلوِّر . ولصهر الثلج والحصول على الماء النقي ، قد يتبادر إلى الذهن أن يُضخ البخار من المبلوِّر إلى الضغط الجوي مع ترك الثلج ينصهر ذاتياً في المبلوِّر للحصول على ماء نقي . ولكن بالطبع يلزم مقدار كبير من الطاقة لضخ البخار من حوالي ٠٠٥ر٠ من الضغط الجوي إلى الضغط الجوي . ولتوفير الطاقة ، فإن عملية صهر الثلج تتم بطريقة أخرى حيث يُضخ البخار الموجود في المبلور إلى وعاء يعرف بالمصهر ضغطه أعلا نسبيا من ضغط المبلور . ويتم تغذية الثلج أيضا المتكون في المبلور إلى المصهر (لاحظ أن ضغط بخار الثلج عند نقطة الانصهار في حالة الاتزان مع ماء نقي هو ٦ر٤ مم فقط) .

ونظراً لأن فرق الضغط بين الدخول والخروج من الضاغط في حدود من ١ - ٢ مم زئبق ، فإن استهلاك القدرة يصبح أقل بكثير من القدرة اللازمة لكي نضغط البخار إلى الضغط الجوي . بالإضافة إلى هذا ، فإن هذه الطريقة لها المَيِّزتان الآتيتان . أولًا : عدم فقد البخار لكنه يتحول إلى ماء عندما يلامس الثلج في المذيب . ثانياً : استخدام الحرارة اللازمة لصهر الثلج في تكثيف البخار . ويصهر تكثيف ١ كجم بخار مامقداره ٥ر٧ كجم ثلجاً كما وضح سابقاً . وفي الواقع ، فإن المصهر

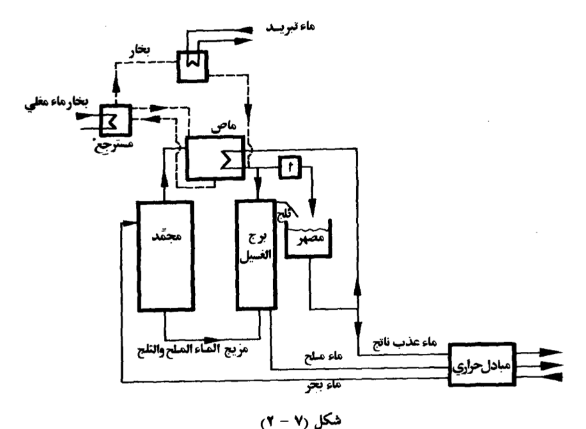
سيحصل على كمية كبيرة من الحرارة نتيجة عدم كمال كل من الضاغط والعملية الأدياباتية مما قد يُسبب ارتفاع درجة حرارة البخار نسبياً ، هذا بالإضافة إلى كمية الحرارة المتسربة من الجو المحيط إلى المصهر . وللمحافظة على درجة الحرارة في حدود الصفر المئوي ، ولخفض الضغط الذي يعمل الضاغط ضده ، فإنه يلزم وجود وحدة تبريد إضافية . ويُترك الثلج المنصهر الوحدة خلال مبادل حراري حيث يُستخدم في تبريد ماء البحر .

ويَعتمد أداء الوحدة ، إلى حد كبير ، على الضاغط الذي يعمل على فرق ضغط صغير ، بينما يضغط حجماً كبيرا من البخار لكل وحدة حجم من الماء العذب . فعند درجة حرارة حوالي ١٠٠ مئوية وضغط جوي ، يكون حجم الطن المتري من بخار الماء المشبع حوالي ١٦٧١ متراً مكعباً ويكون هذا هو الحجم الذي يعطيه الضاغط الذي يعمل في ظروف عمل مشابهة . ومن جهة أخرى ، يكون الحجم المناظر لبخار الماء المشبع عند درجة الصفر المئوي هو ٢٠٦٠٠٠ متر مكعب لكل طن ماء . وعليه ، يجب تصميم الضاغط بحيث يُمكنه مناولة حجم كبير من بخار الماء لفرق ضغط صغير . وهذا يجعل النافخات الدائرية أكثر ملاءمة لهذا التطبيق . ولقد تم تطوير المراوح ذات الريش المرنة لهذا الغرض . ولقد أفاد هذا التطوير في تقنية الضواغط في الصناعات الأُخرى غير إعذاب المياه بالتجميد والتي تحتاج إلى ضغط صغير جدا .

وللمحافظة على ضغط هواء منخفض في المجمد ، كان من الضروري التخلص من هواء ماء التغذية . لذا يلزم إعداد نظام للتخلص من أي أثر للهواء لم يمكن إزالته في نازع الهواء من المكان المخصص للبخار في المجمد .

وبدلًا من استخدام نظام تبريد بالانضغاط كما قُدم سابقاً ، يمكن استخدام نظام تبريد بالامتصاص . وفي هذه العملية ، يتم امتصاص البخار بوساطة مُسترطَب (أي مادة لامتصاص الرطوبة) hygroscopic صلبٍ أو سائل . ويتم تبريد هذا المسترطب أثناء عملية الامتصاص نتيجة تبادل الحرارة بانصهار الثلج . ويمكن استخلاص بخار الماء الممتص بالتسخين في وعاء منفصل حيث يُستعاد المسترطَب ويمكن استعماله مرة أخرى . ونظم التبريد بالامتصاص معتادة في التطبيقات المنزلية وعلى سبيل المثال نوع سيرفل الكترولكس Servel-Electrolux .

ويوضح الشكل رقم (٧ — ٢) فكرة التبريد بالامتصاص عندما يُطبق على إعذاب المياه الملحة . ويدخل ماء البحر المبرد مسبقاً إلى المُجمِّد المعزول حرارياً حيث يتم تبخيره ويتكون الثلج كما وُصف في العملية السابق شرحها . ويتم ضخ السائل الغليظ القوام slurry للثلج والماء الملح إلى برج الغسيل حيث يرتفع الثلج ببطء أثناء غسله بنسبة بسيطة من الماء العذب الساري في اتجاه مضاد . ويُمتص البخار من المجمِّد بمحلول يحتوي على من ٥٠٪ إلى ٥٣٪ بالوزن من كلوريد الليثيوم الذي



شكل (٧ - ٢)

رسم تخطيطي لعملية التجميد المباشر بالامتصاص . والخطوط المتصلة تمثل الدائرة الأساسية . الخطوط المنقطة تمثل دائرة استرجاع المادة الماصة absorbent . التبريد المساعد يضاف عند نقطة أ .

له ضغط بخار ماء جزئي صغير جدا . وتتسبب عملية الامتصاص - التي تتم عند درجة ١٢ إلى ١٥ مئوية - في إخراج أو طرد كمية من الحرارة . ومن الضروري المحافظة على محلول كلوريد الليثيوم عند هذه الدرجة المنخفضة للحرارة ، وإلا سوف يرتفع الضغط الجزئي لبخار ماء المحلول وبالتالي لايمكنه امتصاص بخار الماء من المجمّد . ومن حيث المبدأ ، فإنه من الممكن استعمال الثلج المغادر لبرج الغسيل كمبرد لمحلول كلوريد الليثيوم إلا أنه من الأوفق دوران كمية كبيرة من الماء العذب للاستخدام في صهر الثلج ثم لتبريد المحلول في الماص absorber ويتم تغذية الثلج في المصهر باستمرار إلى سريان الماء العذب الدوّار . ويتم أيضا استخلاص الناتج باستمرار من هذا السريان مع المحافظة على كمية الماء العذب الدوار ثابتة .

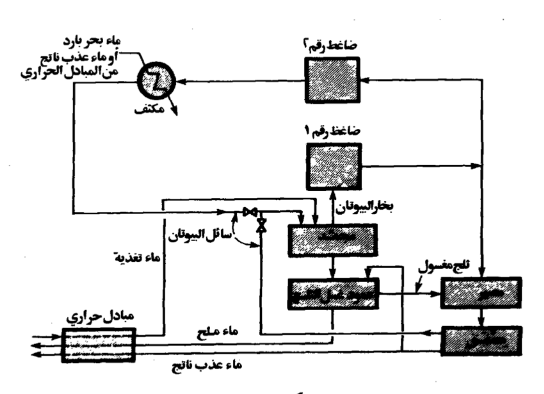
ولإزالة الماء الممتص من محلول كلوريد الليثيوم وبالتالي المحافظة على درجة تركيز عالية وضغط جزئي منخفض ، يتم ضخ جزء من المحلول إلى المسترجع الذي يحوى ملفات بخار فيتم غلي المحلول وإرجاعه مرة أخرى إلى الماص . ويمر البخار المتكوّن في المسترجع إلى مكثف سطحي حيث يكثف باستخدام ماء البحر ، ويخلط البخار المتكثف بسريان الماء العذب والدوار .

ويجب أن يكون هناك تبريد إضافي للمحافظة على درجة حرارة ثابتة . ومن الضروري أيضا وجود نظم لنزع الهواء المذاب في الماء ونظم تعقيم للماء كما هو الحال في نظام التبريد بالانضغاط .

التجميد غير المباشر

تستخدم هذه الطريقة مبرداً ذا ضغط جزئي أعلى بكثير من الضغط الجزئي للماء ، حتى يمكن التغلب على العيوب الناتجة من انخفاض الضغط الجزئي للماء عند درجة التجمد ، مما يسبب انخفاض كثافة بخار الماء ، وبالتالي يزداد حجم البخار الذي يلزم إزاحته ، هذا بالإضافة إلى الحاجة إلى جهاز محكم للتفريغ . وبالطبع ، يجب أن يُختار المبرد بحيث لايكون ذوَّاباً في الماء حتى تسهل عملية الفصل . وتتوافر هذه الصفات في مبردات مختلفة تُستعمل في هذا المجال مثل البيوتان والمواد العضوية المفلورة **fluorinated organics** ، مثل فريون ١١٤ .

ويُبيِّن شكل (٧ – ٣) رسماً توضيحياً لعملية التجميد غير المباشر باستخدام البيوتان . وتبلغ درجة حرارة غليان البيوتان عند الضغط الجوي – ٥ر٠°م مما يجعلها قريبة جداً من درجة حرارة تجمُّد الماء . ويدخل كل من سائل البيوتان وماء التغذية إلى المجمِّد ، حيث الضغط أقل بقليل من



شكل (٧ – ٣)

رسم توضيحي لعملية التجميد غير المباشر . عن كارنوفسكي **Karnofsky** (١٩٦١) .

الضغط الجوي ، مما يسبب غليان البيوتان بعد أن يأخذ الحرارة اللازمة للتبخير من الماء بتحويله إلى ثلج . ويتكون ١٥ر١ طن من الثلج بتبخير طن واحد من البيوتان (الحرارة اللازمة لتبخير البيوتان عند درجة – ٣ م حوالي ٩١ سعر/كجم) . ويتم غسل مزيج الثلج والماء الملح بكمية صغيرة من تيار معاكس من الماء العذب ، بينما يذهب معظم بخار البيوتان إلى الضاغط رقم ١ حيث يُضغط إلى ضغط أعلى من الضغط الجوي بقليل . وفي المصهر ، يتم التلامس ما بين البيوتان من الضاغط والثلج ، مما يسبب انصهار الثلج مع تكثف بخار البيوتان إلى سائل البيوتان ، ثم يتم فصل الماء عن البيوتان في المصفق decanter نتيجة لاختلاف الكثافة (١ و ٦ر٠ على التوالي) . ويتم إرجاع سائل البيوتان إلى المجمِّد ، بينما يخرج الماء العذب من وحدة إزالة الملوحة بعد استخدامه لتبريد ماء البحر في مبادل حراري . وتَستَخدم عملية الفريون ١١٤ طريقة الانصهار غير المباشر بدلًا من الانصهار بالتلامس المباشر (التي يَستخدمها البيوتان) مما يقلل تلوث الثلج المذاب بسائل التبريد .

ويمر جزء صغير من بخار البيوتان إلى الضاغط رقم ٢ حيث يُضغط إلى ضغط أعلى من الضغط الناتج من الضاغط رقم ١ . ويُمرر البخار الناتج من الضاغط رقم ٢ إلى مكثف بالمياه حيث يتكثّف بخار البيوتان إلى سائل ويعود إلى المجمِّد . وتُعتبر هذه الدورة الإضافية للبيوتان بمثابة التبريد المساعد اللازم لتعويض الحرارة المتسربة إلى وحدة إزالة الملوحة حتى يمكن المحافظة على درجات حرارة باردة متواصلة .

ومن المفيد جدا الآن مقارنة الطاقة اللازمة لعملية التجميد بطرق إزالة الملوحة الأخرى بالإضافة إلى عرض ميزات التجميد المباشر وغير المباشر التي تم شرحها في هذا الفصل .

متطلبات القدرة

يتناسب الحد الأدنى للقدرة اللازم لفصل الماء العذب من ماء البحر طردياً مع درجة الحرارة المطلقة كما هو مبين في الملحق (١ أ) . وتُقدر هذه الطاقة باستخدام عملية انعكاسية حيث لايوجد تحويل للطاقة ذات النوعية العالية إلى حرارة ذات النوعية المنخفضة . ولاتعتمد قيمة هذا الحد الأدنى على نوع العملية العكسية . وتبدأ كل العمليات الانعكاسية بماء البحر عند درجة الحرارة المحيطة وتنتج ماءً عذباً وآخر ملحاً عند نفس درجة الحرارة تقريبا ، بالرغم من أن المراحل الهامة في العمليات المختلفة تتم عند درجات حرارة مختلفة . ولتوضيح ذلك ، فإننا نجد أن الضواغط في عملية إزالة الملوحة بالتجميد المباشر وعملية التقطير بالانضغاط – والمشروحتان في هذا الفصل والفصل الخامس على التوالي – تعملان عند درجة – ٣ و ١٠١ م ، على التوالي . ولكن ، عند تشغيل جميع مكونات الوحدة بطريقة مثالية ، فإنه يمكن نظرياً استرجاع القدرة الزائدة داخل وحدة إزالة الملوحة ، مما يجعل كل عمليات إزالة الملوحة تحتاج لنفس مقدار القدرة لكل وحدة من معدل الماء

العذب الناتج . أما عملياً ، فإن معظم القدرة المستخدمة في عملية إزالة الملوحة يذهب لتعويض الطاقة المفقودة في الأماكن المختلفة لوحدة إعذاب المياه . فعلى سبيل المثال ، تخرج كل من المياه العذبة والمياه المالحة من وحدة إزالة أملاح المياه بالتقطير عند درجات حرارة أعلى نسبيا من درجة ماء البحر المستخدم في وحدة إزالة الأملاح . ويمثل هذا فقداً في بخار التسخين . أما في عملية الإعذاب بالتجميد ، فإن المياه العذبة والمالحة تخرج عند درجات حرارة أقل من درجة التغذية ، مما يتطلب قدرة تبريد إضافية ، وبالتالي يمثل فقداً في القدرة . ومن المثالين السابقين يصبح من المهم أن نسأل السؤال الآتي : أيهما أكثر قيمة فقد سعر حرارة أم فقد سعر تبريد ؟ وعندئذ تُقوّم طريقتا إزالة الملوحة على ضوء كمية الحرارة والبرودة المفقودتين .

ولتقليل مقدار الفقد في القدرة فإنه قد يبدو منطقياً أن نفحص تشغيل وحدة تبريد بالامتصاص حيث إنها تعمل بحرارة البخار وبالتالي فهي تمثل تحويلا مباشراً من حرارة إلى قدرة تبريد . فإذا استُخدم بخار مشبع عند درجة ١٠١ م لتسخين وحدة التبريد بالامتصاص ، بينما استخدم ماء عند درجة الحرارة المحيطة ١٨ م لتبريد الوحدة التي تعمل لحفظ درجة حرارة تجميد قدرها − ٣ م ، فإن كل سعر حراري من البخار ينتج نظرياً ٢٫٨٥ سعر تبريد ، ويمثل هذا الرقم ماتعطية مكنة تبريد انعكاسية مثالية لايمكن تحقيقها عملياً . أما عملياً ، فإن أفضل قدرة تبريد تُقدر بمقدار ٠٫٧ سعر تبريد لكل سعر بخار . وعليه ، ينتج أن إزالة سعر تبريد من المجمِّد عند درجة − ٣ م (لتعويض الفقد في التبريد) ، يتطلب مقداراً من الطاقة المتاحة أكثر من استبدال سعر مفقود من مقطر يعمل عند درجة ١٠١ م . أما إذا لم تستخدم وحدة التبريد بالامتصاص ، وتم تمرير البخار عند درجة ١٠١ م في توربينة ، واستخدمت القدرة الناتجة لتشغيل وحدة تبريد بالانضغاط ، فإننا لن نحصل على كفاءة تبريد أفضل . وعليه ، يمكن القول إنه في معظم الأحوال يعتبر فقد سعر تبريد من وحدة تجميد أكثر أهمية من فقد سعر حرارة من مقطر ، ولكن مع ملاحظة أن احتمال تسرب السعرات الحرارية في وحدة التجميد أقل من احتمال تسرب السعرات الحرارية من المقطر ، وذلك لأن الفرق بين درجة حرارة تشغيل المجمِّد والدرجة المحيطة أقل من الفرق بين درجة حرارة المقطر والدرجة المحيطة .

وتعتمد كمية الحرارة الكلية المنتقلة على كفاءة تصميم وحدة إزالة الملوحة بالتجميد ، وعلى كفاءة العازل الحراري ، وعلى كفاءة الأجزاء المختلفة للوحدة . وعليه ، تكون كمية القدرة الفعلية المستهلكة في الوحدة مقياساً لكل هذه الكفاءات .

ولتقدير مقدار الطاقة المستهلكة في عملية إزالة الملوحة بالتجميد ، فإنه مازال يجب علينا أن نعتمد على تجارب تجري على وحدات صغيرة ومتوسطة واستكمال النتائج للحصول على نتائج للوحدات الكبيرة .

غســـل الثلـــج

حتى الآن يتم الحصول على الثلج في كل عمليات إزالة الملوحة بالتجميد على شكل بلُورات صغيرة . ويعتمد حجم البلُورات على ظروف تكوينها . وتكون مقاسات هذه البلُورات في العادة في حدود ٠٥ر٠ مم ، ولكنه يمكن حاليا الحصول على بلورات حتى ٥ر١ مم في عملية مستمرة . وتُكوّن بلورات الثلج خليطاً سميكَ القوام مع الماء الملح المتبقى . ويحتوى نصف وزن المزيج على الماء الملح ، أما النصف الآخر فيحتوي على ثلج مبلل . ولتسهيل حركة المزيج في المضخات والأنابيب ، فإن بعض الماء الملح يُعاد تدويره في معظم المحطات .

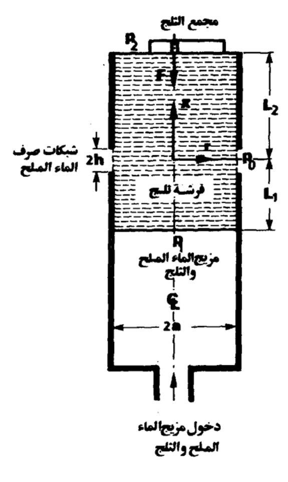
وعموما تزداد سهولة غسل بلورات الثلج كلما زاد حجمها . وتتم عملية غسيل البلورات الصغيرة في الوحدات الموجودة حاليا بطريقة مُرضية ، حيث تُغسل بتمرير المزيج عكسياً مع ماء عذب مما يسبب فقد نسبة مئوية بسيطة فقط من الماء العذب .

وفي عمود الغسيل الموضح في شكل (٧ — ٤) يتم تعديل الضغوط حتى يمكن لمزيج الماء الملح والثلج الداخل من أسفل العمود أن يرتفع إلى منتصف العمود تقريبا حيث يخرج الماء الملح من خلال شبكات محيطية بينما يستمر الثلج الصلب في الارتفاع . وفي النصف العلوي من العمود يتم غسل الثلج المرتفع بكمية صغيرة من سريان معاكس من الماء العذب يدخل إلى العمود من أعلى ويخرج من الشبكات المحيطة أيضاً . ويتم صهر الثلج المتجمع بتكثيف بخار (شكل ٧ — ١) وبهذا يتم إنتاج ماء منزوع الملوحة .

ويمكن استخدام الجهاز المعروف باسم روتوسيل Rotocell ، والذي أثبت نجاحه في عمليات غسيل أخرى ، بدلًا من عمود الغسيل الموضح فيما سبق . ويتكون الجهاز من عدد كبير من خلايا مفتوحة من أعلى تحجز المواد الصلبة ثم تنقلها من نقطة تغذية حول الدائرة إلى نقطة الصرف ، بينما يتم غسله بسريان معاكس . كما يمكن فصل الثلج والماء الملح أيضاً بطريقة القوة الطاردة المركزية . ولكن ، على أي حال ، تمتاز أعمدة الغسيل بعدة ميزات عن هذه الطرق الأخرى .

عملية التميؤ

عند إجراء تجارب تَجمُّد باستخدام أنواع مختلفة من الهيدروكربونات ، فإنه يلاحظ وجود عناصر صلبة أخرى بالإضافة للثلج . فمثلا ، يمكن للبروبان تكوين هيدرات صلبة مع ١٧ جزيئاً من الماء بالرغم من إذابة البروبان السائل لكمية ضئيلة من الماء فقط . وإذا بُرِّد الماء النقي تدريجيا في وعاء يحتوي على بخار البروبان عند ضغط ٩ر٤ جوي ، فإن هذه الهيدرات تبدأ في البلورة عند درجة + ٥ م . أما عند استخدام محلول من كلوريد الصوديوم بتركيز ٥ر٣٪ و ٧٪ والذي يشابه ماء البحر بتركيزه المعتاد وضعف المعتاد ، فإن هيدرات البروبان تتبلور عند درجة حرارة ٥ر٣ م



شكل (٧ - ٤)

عمود غسيل مزيج الماء الملح والثلج بسريان معاكس عن اشوارتز و بروبشتاين Schwartz and Probstein (١٩٦٩) .

و٦ر١ م ، على التوالي . وعند الدرجة الأخيرة ، يكون سائل البروبان المشبع بالماء متزناً أيضا حيث يكون ضغط بخاره الجزئي عند هذه الدرجة ٩ر٤ جوي . وبمقارنة درجات الحرارة هذه بدرجات التجميد المناظرة للثلج عند الضغط الجوي وهى صفر م و ٩ر١ م و ٨ر٣ م ، على التوالي ، يتضح من هذه المقارنة أن الهيدرات تتكون عند درجات حرارة أعلا من اللازمة للثلج بمقدار ٥ إلى ٦°م . وعليه ، فإن عملية إزالة ملوحة المياه بتكوين بلورات من هيدرات البروبان يمكن أن تعمل عند درجة حرارة أعلا نسبيا من تلك اللازمة لعمليات التجميد .

ولقد تم إجراء بعض التجارب المعملية والدراسات الأولية الهندسية لهذه العملية . وتتشابه هذه العملية بعملية لإزالة الملوحة بالتجميد غير المباشر . فبدلا من وجود مزيج من الماء الملح والثلج يوجد مزيج من الهيدرات والماء الملح . ويتحرك هذا المزيج من المُجمِّد والمُبلوِّر إلى عمود الغسيل

وبعد ذلك إلى وعاء الذوبان . وهناك يُلامس المزيج بخار البروبان الذي يتكثف إلى سائل يحلل الهيدرات إلى ماء وبروبان . وتقدر حرارة التحلل بحوالي ٨٤ كيلو سعر حراري لكل كيلو جرام ماء ، وتماثل تقريباً الحرارة اللازمة لانصهار الثلج . ويُعاد دوران سائل البروبان مرة أخرى بينما يُسحب الماء النقي من الوحدة .

وحيث إن عملية التميؤ (الهيدرات) يمكن أن تعمل عند درجات حرارة أعلا نسبياً من عمليات التجمد المعتادة ، فإن فقدان البرودة إلى الجو المحيط سيكون أقل . ومن جهة أخرى ، فإنه يلزم للمعدات أن تتحمل ضغوطاً أعلا من تلك المطلوبة في عملية التجميد غير المباشر باستخدام البيوتان كمُبرِّد .

مراجع مختارة

The following three Research and Development Reports of the Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior, are for sale by the Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.20402.

Reserarch and Development Report No.282 (Catalogue No. I1.88:282): Latini, R.G., Rouher, O.S., Agrawal, P.D., and Barduhn, A.J., The Freezing Process for Desalting Saline Waters, 1967.

Research and Development Report No.373 (Catalogue No.I1.88:373): Williams, V.C., Roy, C.L., Smith, H., Jr., and Battle, O.B., Development of Propane-Hydrate Desalting Process, 1968.

Research and Development Report No.451 (Catalogue No.I1.88:451): Consie, R., Darling, R., Emmermann, D., Fraser, J., Johnson, W., Koretchko, J., and Torvbraten, F., Vacuum-Freezing Vapor-Compression Process: One and Five Million Gallon per Day Desalting Plants, 1969.

Zarchin, A., Method for Separating the Solvent from the Solute of Aqueous Solutions, *U.S. Patent* 2,821,304 (Jan. 28, 1958).

Zarchin, A., Process and Apparatus for Sweetening Sea Water, *British Patent* 806,727 (Dec. 31, 1958).

Karnofsky, G., "Saline Water Conversion by Freezing with Hydrocarbons," *Chem. Eng. Progr.* 57:42 (January 1961).

Bosworth, C.M., Barduhn, A.J., and Sandell, D.J., "A 15,000 Gallon per Day Freeze-Separation Pilot Plant for Conversion of Saline Waters," *Advances in Chemistry Series, No.27,* American Chemical Society, Washington, D.C., 1960, p.90.

Shwartz, J., Probstein, R.F., "Experimental Study of Slurry Separators for Use in Desalination," *Desalination* 6:239 (1969).

Knox, W.G., Hess, M., Jones, G.E., and Smith, H.B., "The Hydrate Process," *Chem. Eng. Progr.* 57:66 (February 1961).

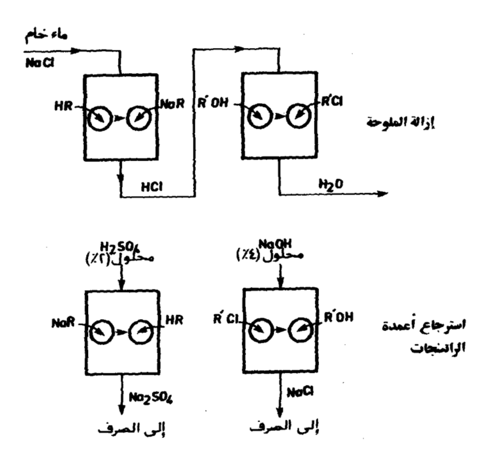
٨ التبادل الأيوني

■ الفكرة الأساسية ■ سعة الراتنج ■ كميات المواد الكيميائية اللازمة للاسترجاع
■ تعديلات خاصة لإزالة الملوحة بالتبادل الأيوني ■مراجع مختارة

الفكرة الأساسية

تُستخدم طريقة التبادل الأيوني ion exchange للإزالة الكلية للأملاح من المياه منذ الثلاثينيات من هذا القرن لمعالجة المياه في غلّايات الضغط العالي والتي تحتاج إلى ماء خالٍ تماماً من الأملاح . وتُعرف هذه الطريقة بإزالة المعادن نسبة إلى أنها تزيل المحاليل الكهربائية التي ، إلى حد كبير ، لها أصل معدني ، وتَستخدم هذه الطريقة بشكلها المألوف مواد كيميائية تُساوي تقريبا كمية الأملاح المُزالة . لهذا يمكن لهذه الطريقة منافسة طرق إزالة الملوحة الأخرى فقط في حالات ما إذا احتوت المياه على تركيزات صغيرة نسبياً من الأملاح . وطرق التبادل الأيوني لها أهمية في الحالات التي تحتاج إلى مياه ذات تركيز ضئيل جداً من الأملاح وموصلة كهربائياً ، مثل صناعة صمامات التليفزيون . ولكن هذه التطبيقات لا تقع ضمن الموضوع الرئيس لهذا الكتاب على أي حال ، ولكن ذكر هذا للإشارة فقط . وحيث إن طرق التبادل الأيوني تُستخدم في بعض الأحيان لإزالة ملوحة المياه ، سنوجز هنا وصفاً مختصراً لهذه الطرق . ولمعلومات تفصيلية أكثر يُمكن للقارىء الرجوع إلى المقالات العلمية التفصيلية المتخصصة .

يُبين الشكل (٨ –١) الفكرة الأساسية لإزالة الملوحة بالتبادل الأيوني . ويُمرر الماء الخام خلال عمود يحتوى على مُبادِلٍ صلب للأيونات الموجبة الشحنة – والذي يعرف بالمبادل الصلب الكاتيوني solid cation exchanger – في صورته النشطة . وهذا المبادل عبارة عن راتنج عضوي organic resin يحتوي على أيونات الهيدروجين وله القدرة على تبادل هذه الأيونات مع الأيونات الموجبة الموجودة في الماء الخام . ويكون التبادل جزئياً إذا خُلط الماء مع الراتنج في خزان بدلًا من تمرير الماء خلال العمود . ولكن بتمريره على العمود فإن الماء يتبادل الأيونات أولًا مع الطبقة العليا



شكل (٨ – ١)

الفكرة الأساسية لإزالة الملوحة بالتبادل الأيوني . HR و NaR تمثل الصورة النشطة والخاملة على الترتيب للمبادل الكاتيوني . R´OH و R´Cl تمثل الصور المناظرة للمبادل الأنيوني .

من الراتنج والتي تتبادل الأيونات جزئياً مع الماء ، ثم بمرور الماء ببطءٍ أسفل العمود يتبادل الماء باقي الأيونات الموجبة (التي لم تُنزع في الطبقة العليا) مع باقي طبقات الراتنج النشطة . وهكذا ، بمغادرة الماء للعمود الأول يكون قد تم استبدال جميع أيوناته الأصلية الموجبة بأيونات هيدروجين ، ويكون الماء في الحقيقة قد تحول إلى محلول حمضي مخفف . ويُبين شكل (٨ – ١) تفاعلات التبادل الأيوني لأيونات الصوديوم . وتتم تفاعلات مماثلة لأيونات الكالسيوم والمغنسيوم .

ويحتوي معظم الماء الخام على بعض البيكربونات والتي تتحول إلى حمض الكربونيك بهذه العملية ثم يُمكن إزالته بالتهوية (هذه الخطوة غير موضحة في شكل ٨ – ١) . ويُمرر الماء الحمضي acid water بعد ذلك في عمود تبادل الأيونات السالبة – أو مايعرف بعمود تبادل أنيوني anion exchange column – يحتوى على راتنج آخر لتبادل جميع الأيونات السالبة بأيونات الهيدروكسيل OH^- . وعليه ، يكون الآن قد تم تبادل جميع الأيونات الموجودة أصلًا في الماء الخام بالأيونات H^+ و OH^- على التوالي والتي تتحد معاً لتعطي ماءً نقياً .

بعد بضع ساعات من عملية إزالة الأملاح تكون الراتنجات في العادة قد تبادلت معظم أيوناتها من H^+ و OH^- والتي احتوتها في البداية . لذا يلزم حينئذ استرجاع الراتنجات لصورتها النشطة . ويتم هذا بتمرير محاليل معتدلة التركيز من حمض وهيدروكسيد خلالها على التوالي . وللوهلة الأولى قد يبدو هذا متناقضاً ، إذ يتم في مرحلة إزالة الملوحة من العملية إبدال الكاتيونات والأنيونات الموجودة بالماء بأيونات الهيدروجين والهيدروكسيد على التوالي من الراتنجات ، بينما يحدث العكس تماماً في مرحلة الاسترجاع . وأحد أسباب ذلك ، هو أن التفضيل النسبي للراتنجات لبعض الأيونات يقل بزيادة التركيز . فإذا لامس المبادل الكاتيوني مياهاً طبيعية أو بعض المحاليل المخففة جدا ، فإنه يُفضل احتواء أيونات الكالسيوم والمغنسيوم بدلا من أيونات الهيدروجين ، بينما إذا لامس المبادل الكاتيوني محلولًا عالى التركيز من أيونات الهيدروجين فإنه يُطلق معظم أيونات الكالسيوم والمغنسيوم . وحتى إذا لم يكن الوضع كذلك ، فإنه سيكون ممكناً إزالة كل الكالسيوم والمغنسيوم من عمود التبادل الكاتيوني بالتمرير المستمر لمحلول حمضي مخفف خلاله لوقت طويل كاف .

وبعد عملية الاسترجاع يتم شطف الراتنجات فتصبح نشطة مرة أخرى ويمكن استخدام عمود واحد يحتوي على خليط من راتنجات التبادل الكاتيوني والأنيوني بدلًا من استعمال عمودين منفصلين . وفي هذه الحالة ، يتم توفير الفصل الهيدروليكي لنوعي الراتنجات عندما تنضب ، ثم يتم استرجاعها وغسلها منفصلة ثم تخلط بوساطة هواء مضغوط . وفي حالة الفصل الهيدروليكي فإن راتنج التبادل الأنيوني الخفيف يُكوِّن الطبقة العليا .

تختلف إزالة الملوحة بالتبادل الأيوني عن التيسير (إزالة العسر) بالتبادل الأيوني والذي يتم بتبادل أيونات الكالسيوم والمغنسيوم المكونة للعسر بأيونات الصوديوم . وبناء على ذلك ، فإن إزالة العسر تُعتبر عملية لتبادل الكاتيونات ، بينما تتطلب إزالة الملوحة الكاملة تبادل كل من الكاتيونات والأنيونات ، وغالبا مايحتاج الماء العسر إلى تيسيره بالتبادل الأيوني أو أية طرق أخرى قبل إزالة الملوحة كلياً . وتُستخدم نفس راتنجات التبادل الكاتيوني في العمليتين (إزالة العسر وإزالة الملوحة) مع بناء مماثل للأعمدة ، ولكن تحتاج أعمدة إزالة الملوحة إلى طبقات فعّالة للحماية من التآكل حيث تتلامس مع المحاليل الحمضية .

وبالرغم من أن تشغيل أعمدة التبادل الأيوني سهل ميكانيكياً ، إلا أنه يجب لفت النظر إلى أن تصميم أعمدة العمليات عالية الكفاءة يُعتبر أكثر تعقيداً ، وذلك لتغير مُكونات الراتنج والمحلول من القمة إلى القاع ، بالإضافة إلى تغير تركيب المواد الصلبة والسائلة بمرور الوقت . ويمكن مقارنة هذا بعمليات حالات الاستقرار ، مثل انتقال الحرارة بين سريان مائعين ، أحدهما ساخن والآخر بارد ، منفصلين بحوائط صلبة لانتقال الحرارة . ففي هذه الوحدات ، تتغير درجات حرارة المائعين بتغيُّر الموضع مع بقائها ثابتة في نفس الموضع (في حالة الاستقرار) . ونظرية تصميم أعمدة التبادل الأيوني

أكثر تعقيداً من هذا المثال ، خصوصا إذا احتوى المائع على أيونات موجبة عديدة مثل الصوديوم والكالسيوم والمغنسيوم وأيونات سالبة عديدة مثل الكلوريد والكبريتات والبيكربونات . وفي الحقيقة ، فقد شجع تطور تقنية التبادل الأيوني على تطورات هامة في طرق تصميم الفصل العمودي ، إذ كانت هناك محاولة لفصل المواد الذائبة المختلفة بتمرير المحلول خلال أعمدة صلبة لامتصاص المكونات المختلفة المذابة وذلك بشدة مختلفة و/أو بمعدلات مختلفة . ولبعض الأسباب التاريخية ، يسمى هذا بالفصل الكروماتوجرافي chromatographic separation . وتستخدم هذه الطرق للفصل في أغراض أخرى مختلفة بخلاف إزالة عسر الماء مثل فصل أيونات الأرضيات النادرة والمكوّنات الأخرى الذائبة والتي لها نفس الخصائص ويصعب فصلها بطرق أخرى .

وبالرغم من أن التبادل الأيوني يتم عادة بطريقة متقطعة – في الأعمدة الساكنة – كما هو مبين في شكل (٨ – ١) ، إلا أن عمليات التبادل الأيوني المستمرة قد تطورت بحيث يتحرك الراتنج الصلب في اتجاه معاكس للمحلول المطلوب إزالة معادنه . وتتميز هذه الطريقة باستخدام مقادير من الراتنج أقل من المطلوب في حالة الأعمدة الساكنة ، والتي بها جزء محسوس لايشترك في عملية إزالة المعدن لبعض الوقت . (على سبيل المثال ، بعد بداية الاسترجاع مباشرة ، يشترك فقط الجزء العلوي من العمود بطريقة فعالة في عملية التبادل الأيوني بينما لايشترك باقي العمود بطريقة مؤثرة .) وعلى أي حال ، تُعتبر وحدات التبادل الأيوني المستمر أكثر تعقيداً ميكانيكياً من وحدات الأعمدة الساكنة . وعلى عكس الوضع في حالة وحدات السريان المعاكس للموائع ، مثل وحدات امتصاص الغاز والسائل المستخدمة في الصناعات البترولية ، فإن الطبيعة الصلبة للراتنجات والاستعداد الخطر للميل لكسر الجسيمات الصلبة المتحركة يُعقّد بناء هذه الوحدات .

سعة الراتنج

يجب أن يتميز التبادل الأيوني الجيد بسعة تبادل عالية – أي بكمية كبيرة من الأيونات المتبادلة لكل وحدة من الراتنج – حتى يمكن إتمام عملية إزالة الملوحة في زمن طويل نسبيا قبل إيقاف التشغيل لاسترجاع الراتنج . وتُقدّر السعة غالباً بوحدة ملّي مكافىء milliequivalent من الأيونات المتبادلة لكل جرام من الراتنج الجاف ، وهي على هذا المقياس حوالي ٥٫٠ لراتنجات التبادل الكاتيوني التجارية (يناظر ١١٥ جراماً من أيونات صوديوم ممتصة لكل كيلو جرام من الراتنج الجاف) وماقيمته ٣٫٠ لراتنجات التبادل الأنيوني التجارية (يناظر ١٠٦ جرامات من أيونات الكلوريد لكل كيلو جرام) .

وفي كثير من المطبوعات ، تُعطى السعة بدلالة كيلو حبة kilograins كربونات كالسيوم لكل قدم مكعب من سعة العمود . وتُمثل هذه الوحدة كمية الملح (أي كربونات الكالسيوم) التي

تخضع للتبادل الأيوني مع كمية الراتنج الموجودة في قدم مكعب لعمود غير محكم الحشو . وتُمثل كمية الملح بدلالة كربونات الكالسيوم (وبالرغم من عدم ذوبانية كربونات الكالسيوم) ، أي يؤخذ كل جرام مكافىء ملح بمقدار ٥٠ جراماً . وعلى هذا المقياس ، تُقدر سعات الراتنجات السابقة تقريبا بحوالي ٤٠ للمبادل الكاتيوني و ٢٤ للمبادل الأنيوني .

ولا تُستخدم السعة الكلية لعمود الراتنج على الإطلاق ، إذ إن عملية إزالة الملوحة لايمكن أن تكتمل عندما يقترب الراتنج من الاستنفاد . ويُستخدم عمليا ٧٠٪ من السعة الكلية قبل عملية استرجاع الراتنج .

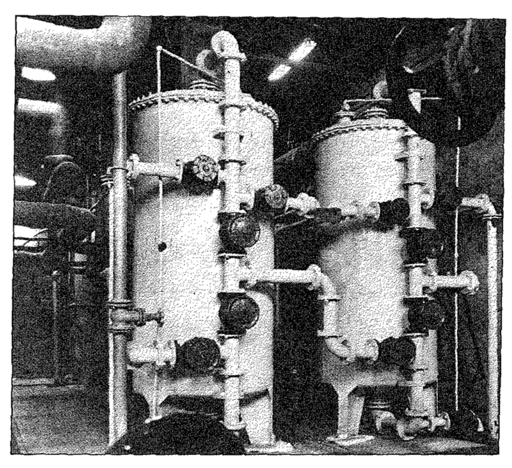
كميات المواد الكيميائية اللازمة للاسترجاع

تُمثل نسبة الأوزان المكافئة للملح وحمض الكبريتيك وهيدروكسيد الصوديوم القيم ٥٨ر٤ : ٤٩ : ٤٠ . ويعني هذا أنه يلزم لكل كيلو جرام من الملح المزال ٠ر٨٤ و ٠ر٦٩ كجم من هذين المسترجعين . ويُستخدم عملياً مايعادل من ٥٠ إلى ٣٠٠٪ من المسترجع اعتماداً على الدرجة المطلوبة لإزالة الملح . وبالتقريب ، يحتاج كل كيلو جرام من الملح المزال إلى حوالي ١ر٥ كجم من كل من الحمض والقاعدة النقيين . فعلى سبيل المثال ، لو احتوت التغذية على ٣٥٠ جزءاً من الملح في المليون ، فإن احتياج محطة إزالة ملوحة بسعة يومية قدرها ١٠٠٠ متر مكعب هو بالتقريب حوالي ٠ر٥ طن من الحمض و ٠ر٥ طن من هيدروكسيد الصوديوم يومياً . أما إذا كانت الملوحة ٣٥٠٠ جزء في المليون ، فإن الاحتياج اليومي من كل مادة كيميائية يُصبح أكثر من ٥ أطنان في اليوم* .

وكنتيجة للاحتياج إلى كميات كبيرة من المواد الكيميائية اللازمة للاسترجاع ، تُعتبر إزالة المعادن بالتبادل الأيوني بالطريقة التقليدية غير مجدية اقتصاديا لمعالجة المياه مرتفعة الملوحة . ولقد كانت هناك عدة محاولات للاستفادة التامة من المسترجعات باستخدام راتنجات خاصة للتبادل الأيوني مع/أو خطوات خاصة للاسترجاع . فعلى سبيل المثال ، صورة الصوديوم في الراتنجات ضعيفة الحموضة للتبادل الكاتيوني – حيث تكون مجموعات التبادل الكاتيوني كربوكسيلية – يُمكن استرجاعها بكافاءة أعلى باستخدام أحماض ضعيفة بالمقارنة بالمبادلات الكاتيونية قوية الحمضية المعروفة ، والتي تكون مجموعات التبادل الكاتيوني بها سلفونية . ويعني هذا أن الراتنجات ضعيفة الحمضية لها ميل أكبر لحفظ (وميل أقل لإطلاق) أيونات الهيدروجين بالمقارنة بالراتنجات قوية الحمضية . وكنتيجة لهذا ، فإن راتنجات التبادل الكاتيوني ضعيفة الحمضية تزيل أيونات الصوديوم من الماء الملح في خطوة إزالة الملوحة بدرجة أقل من الراتنجات قوية الحمضية ، ولكن ما لم يتطلب

---

* هذا يكلف تقريبا حوالي ٧٠٠ دولار لكل متر مكعب من الماء العذب (بسعر عام ١٩٧٦) .



شكل (٨ - ٢)

محطة إزالة الملوحة بالتبادل الأيوني . وتستخدم وحدة من هذا النوع تمد جزءا من ماء الشرب لمدينة ايلات على البحر الأحمر . وتستخدم الوحدة ماءً ضارب الملوحة من المياه الجوفية كمصدر للماء الخام . بإذن من شركة أيالون وإتزيوني بحيفا بفلسطين المحتلة .

الأمر ماءً نقياً ، فإن هذه الغرامة غالبا ماتعتبر عديمة الأهمية بالمقارنة بالوفر في الحمض في مرحلة الاسترجاع . وبالمثل ، فإن راتنجات التبادل الأنيوني ضعيفة القاعدية (تحتوي على مجموعات تبادل أمينية ضعيفة القاعدية weakly basic amine-exchange groups) تتطلب كمية أقل من المسترجع ، ولكنها أقل كفاءة كمزيلات أنيونية بالمقارنة براتنجات التبادل الأنيوني قوية القاعدية (التي تحتوي على مجموعات رباعية للتبادل الأنيوني قوية القاعدية) . ويمكن في الغالب استرجاع راتنجات التبادل الأنيوني الضعيفة القاعدية بقواعد رخيصة نسبياً مثل الأمونيا .

ولقد تم بنجاح استخدام توفيقات من مبادلات ضعيفة وقوية لإزالة ملوحة الماء الأخضم مع وضع عمود راتنج التبادل الأنيوني في بعض الأحيان قبل عمود التبادل الكاتيوني . ويستخدم بعض

هذه العمليات أكثر من زوج واحد من مبادلات الكاتيونات والأنيونات في وضع متتالٍ . ولمعرفة ما إذا كانت هذه العمليات تتميز اقتصاديا على عمليات الأغشية ، فإنه يلزم أن تُحلل كل حالة من الماء الأخضم على حدة مع استيعاب كامل لطبيعة الأملاح الذائبة في الماء . وعلى العموم ، يجب إعداد الجدوى الاقتصادية لهذه الطرق ، وعلى الخصوص إذا كان تركيز الملوحة أقل من بضعة آلاف جزء في المليون .

تعديلات خاصة لإزالة الملوحة بالتبادل الأيوني

قامت شركات تيسير الماء العسر بالولايات المتحدة وانجلترا باختراع تركيبة معلبة kit لإعذاب ماء البحر للطيارين الذين يُضطرون للهبوط في البحر ثم يستخدمون أطواق النجاة . وأهم مكونات



شكل (٨ – ٣)

تركيبة معلبة لإزالة ملوحة ماء البحر للحالات الطارئة . بإذن من شركة برميوتيت بنيويورك .

هذه التركيبة هي مادة للتبادل الكاتيوني تحتوي على أيونات الفضة والتي تستبدل بجزء كبير من الكاتيونات في ماء البحر . ولاتبقى أيونات الفضة في المحلول ولكنها تترسب في صورة كلوريد الفضة غير القابل للذوبان . وتُضغط مادة التبادل الأيوني في قوالب تحتوي على : (١) طينة قابلة للانتفاخ تعمل كمادة قابلة للتصدع لتشجيع عملية الكسر الميكانيكي السريع عند ملامسة ماء البحر ، (٢) بعض من أكسيد الفضة الذي يتفاعل مع الأملاح في مياه البحر مكونا هيدروكسيد المغنسيوم وكلوريد الفضة غير القابلين للذوبان ، و (٣) كربون منشط لتحسين المذاق . وتمثل كل هذه الكيماويات بالإضافة للعلبة الحاوية لها أقل من سدس حجم الكمية المنتجة من ماء الشرب . ويتلامس ماء البحر مع القوالب في حقيبة بلاستيكية حيث تتم عمليات التبادل الأيوني والترسيب . والماء الناتج بهذه الطريقة يحتوي على عدة آلاف من أجزاء الملح في المليون ولكنه ملائم للاستعمالات الطارئة . ويُسحب الماء من خلال مرشح بداخل الحقيبة البلاستيكية . ويُبين شكل (٨ – ٣) علبة إزالة الملوحة السابق شرحها .

ولتوفير الكيماويات هناك إمكانية لتطبيق عدة تعديلات للطريقة التقليدية لإعذاب الماء بالتبادل الأيوني . فبدلا من استبدال أيونات الملح – الماء بالهيدروجين والهيدروكسيد ، يمكن تحويل الأملاح في المحلول إلى بيكربونات الأمونيا في فَرشة من خليط من الراتنجات . ويسخن حينئذ المحلول الناتج مما يبخر البيكربونات مع بعض الماء . ويحتوي التكثيف الناتج على حوالي ١٣٪ محلول بيكربونات يمكن استخدامها في استرجاع الراتنجات . وعليه ، بدلا من الاحتياج للكيماويات ، يتطلب الأمر وجود بخار للتسخين لتقطير البيكربونات . وتستخدم طريقة سيروثرم Sirotherm – المتوقع نجاحها – راتنجات للتبادل الأيوني يُمكن استرجاعها بالبخار أو الماء الساخن الذي يحتوي على تركيزات من الهيدروجين والهيدروكسيد أكبر منه في الماء البارد . فعند درجات الحرارة المنخفضة ، تمتص الراتنجات أيونات الملح بينما يتم الاسترجاع عند درجات الحرارة المرتفعة . وبناء على ذلك ، فإن المطلوب من الطاقة المتاحة للفصل الجزئي للمياه الملحة يمكن اشتقاقه من دورة لدرجات الحرارة بدلا من استخدام حمض وقاعدة .

مراجع مختارة

عـــام General

Helfferich, F., *Ion Exchange,* McGraw-Hill, New York, 1962.

Nachod, F.C.; and Schubert, J., *Ion-Exchange Technology,* Academic Press, New York, 1956.

النظرية المفصلة لتشغيل العمود Detailed Theory of Column Operation

Helfferich, F., and Klein, G., *Multicomponent Chromatography: Theory of Interference,* Marcel Dekker, New York, 1970.

التبادل الأيوني المستمر Continuous Ion Exchange

Probstein, R.F., "Desalination," *American Scientist* **61** (3): 280 (1973). This article has a photograph of a continuous-moving-bed unit.

استخدام راتنجات ضعيفة الحمضية وأخرى ضعيفة القلوية
Use of Weak-Acid and Weak-Base Resins

Kunin, R., and Vassiliou, B., "New Deionization Techniques Based upon Weak-Electrolyte Ion-Exchange Resins," *Ind. Eng. Chem.* (Process Design Dev.) 3:404 (1964).

استخدام مبخر للماء الملح للاسترجاع في مزيلات العسر بالتبادل الأيوني
Use of Evaporator Brine for Regeneration Ion-Exchange Softeners

Sephton, H.H., and Klein, G., "A Method of Using Irrigation Drain Water for Power-Plant Cooling," *Proceedings of the First Desalination Congress of the American Continent* (Mexico City), Vol.1, Elsevier, Amsterdam, 1976, p.III-2.

الاسترجاع الحراري لراتنجات التبادل الأيوني
Thermal Regeneration of Ion-Exchange Resins

Weiss, D.E., Bolto, B.A., McNeill, R., Macpherson, A.S., Siudak, R., Swinton, E.A., and Willis, D., "The Sirotherm Demineralization Process, An Ion-Exchange Process with Thermal Regeneration," *Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination* (Washington, D.C) Vol. 2, 1965, p.3, for sale by Superintendent of Documents, Washington, D.C. 20402.

Bolto, B.A., "Sirotherm Desalination- Ion Exchange with a Twist," *Chem. Technol.* **5**:303 (1975).

Miscellaneous متنوعات

Permutit Co., Inc., "*Permutit Emergency Desalting Kit,*" New York, 1958.

Stewart, P.B., "Sea Water Demineralization by Ammonium Salts Ion Exchange," *Advances in Chemistry Series, No.27,* American Chemical Society. Washington, D.C., 1960, p.178.

Spiegler, K.S., Juda, W., and Carron, M., "Counterflow Regeneration of Cation Exchanger in Partial Demineralization of Brackish Waters," *J. Amer. Water Works Assoc.* **44**:80 (1952).

٩ التناضح العكسي

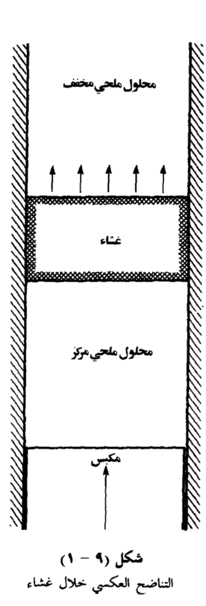
■ التناضح العكسي لماء البحر ■ موضوعات متنوعة ■ استخلاص المذيب ■ تقطير الضغط الحرج ■ التناضح الأيوني وطرق أخرى ■ مراجع مختارة .

يتم في جميع عمليات الترشيح فصل السوائل والغازات من الشوائب الصلبة أو السائلة التي توجد في حالة منفصلة عن حالة السائل أو الغاز . وعليه ، يُمكن فصل شوائب الطين من الماء كما يمكن أيضا فصل جسيمات القار من دخان السجائر . ولقد كان من المعتقد لعديد من السنين عدم إمكانية ترشيح الماء لفصل الملح ، إذ إن محلول الماء الملح يوجد في طور مفرد للمادة ، وهو طور السيولة . ولكن التجارب المعملية في أواخر العشرينات وأوائل الثلاثينيات من هذا القرن أظهرت إمكانية ترشيح محلول مخفف جداً من الماء الملح ، لفصل الملح باستخدام أغشية الكلوديون collodion membranes .

ونتيجة لتزايد الاهتمام بإزالة ملوحة المياه ، أخذت عملية ترشيح الماء الملح في التطور مرة أخرى في الخمسينيات حيث أمكن إزالة الأملاح كليا تقريبا بالترشيح باستخدام أغشية صناعية خاصة . وتسمى هذه العملية للترشيح بالتناضح العكسي reverse osmosis .

وتسمى الأغشية التي تسمح بنفاذ الماء دون الملح بالأغشية شبه المنفذة . ويوضح شكل (٩ – ١) الفكرة الأساسية لعملية التناضح العكسي .

عندما يوضع غشاء شبه منفذ بين ماء بحر وآخر عذب ، كليهما عند نفس الضغط ، فإن الماء العذب ينفذ إلى ماء البحر نتيجة الميل الطبيعي لمساواة التركيز ، وتسمى هذه العملية بالتناضح وهي عكس المطلوب تماماً ، وهو انتقال الماء من الماء الملح إلى خزان الماء العذب . ولحدوث العكس في هذه العملية ، يلزم زيادة الضغط على الماء الملح . ويقدر أقل ضغط للتناضح العكسي من حسابات الحد الأدنى للشغل اللازم لنزع الملوحة في أية عملية عكسية . ويقدر هذا الحد الأدنى للشغل بحوالي



شكل (٩ – ١)
التناضح العكسي خلال غشاء

٠ر٧ كيلو وات في الساعة لإنتاج متر مكعب واحد ماء عذب من ماء بحر عند درجة ٢٥ مئوية ، كما وُضح في الفصل الثالث . ولكن مقدار كيلو واحد في الساعة من الطاقة يعادل الشغل الناتج من حركة ٥٥ر٣ × ١٠^٤ لتر ماء ضد فرق ضغط ١ جوي أو حوالي ٥ر٣٥ متر مكعب من الماء ضد ١ ضغط جوي . وينتج بالتالي أن دفع متر مكعب واحد من الماء ضد فرق ضغط قدره ٠ر٧ × ٥ر٣٥ = ٨ر٢٤ جوي يعادل شغلًا قدره ٠ر٧ كيلووات في الساعة . وبطريقة أخرى ، يمكن القول بأن أقل ضغط يلزم تطبيقه على ماء البحر لترشيحه خلال الغشاء وتحويله إلى ماء عذب يجب أن يزيد قليلا عن ٨ر٢٤ جوي . ويُسمى هذا الضغط بالضغط التناضحي لماء البحر ومنه سُميت عملية التناضح العكسي .

ويلزم عمليا أن يرتفع الضغط عن ضغط التناضح ليتسنى الترشيح بمعدل معقول . كما يجب أن يُؤخذ في الاعتبار ارتفاع قيمة ضغط التناضح مع استمرار عملية التناضح العكسي نظراً للارتفاع المصاحب في تركيز ماء البحر . وبالتقريب يتضاعف الضغط التناضحي بتضاعف تركيز ماء البحر ولكن مع مراعاة أن علاقة الزيادة في قيمة ضغط التناضح ، مع زيادة التركيز علاقة غير خطية . فمثلًا ، ضغط تناضح ماء البحر الميت يزيد جدا عن الضغط التناضحي المتوقع لتركيز الملح به .

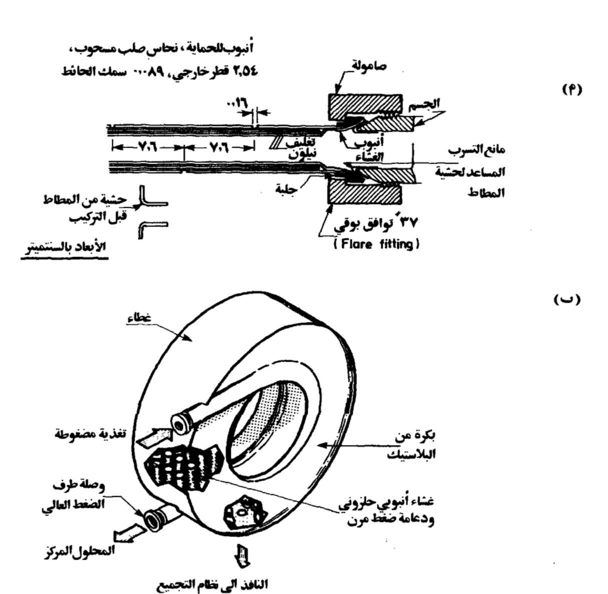
والمشكلة الأساسية في هذه الطريقة هي إعداد الأغشية المناسبة . ولقد كانت هناك محاولات عديدة للتغلب على هذه المشكلة . فمثلا ، يمكن حالياً تصنيع الأغشية من رقائق من مواد بلاستيكية مثل الكحول المتعدد الفنيل polyvinyl alchohol أو من أسيتات السليلوز cellulose acetate . وقامت دراسات عديدة لمعرفة العلاقة بين تركيب هذه الرقائق وقدرتها على ترشيح الملح . وهناك اتجاه آخر لإعداد الأغشية ، فمن المعروف جيدا أن مواد التبادل الأيوني تفضل اجتذاب الماء عن اجتذاب الملح إذا ما لامست محلولا ملحاً . وتُعرف هذه الظاهرة بتأثير دونان Donnan effect . وأدت هذه الظاهرة إلى استخدام أغشية التبادل الأيوني للترشيح أو للتناضح العكسي .

وتحتوي كثير من الوحدات على أغشية مصنوعة من أسيتات السليلوز المعدلة . ولهذه الأغشية الميزتان الآتيتان : قدرة مرتفعة على حجز الأملاح (٩٥ – ٩٩٪) عند إعذاب الماء الأخضم ومعدل مرتفع نسبيا لترشيح الماء . فمثلا ، يُقدر معدل ترشيح هذه الأغشية بحوالي من ٦ إلى ١٢ لتراً من الماء يومياً لكل متر مربع من مساحة الغشاء ولكل ضغط جوي واحد زائد عن ضغط التناضح (أي حوالي من ٤ر٨ إلى ٨ر١٦ رطلًا من الماء يومياً لكل قدم مربع من مساحة الغشاء ، ولكل ١٠٠ رطل على البوصة المربعة من الضغط زائد عن ضغط التناضح) . ولقد تطورت هذه الأغشية في لوس أنجيلوس في نهاية الخمسينيات بوساطة س . سوريراجان S. Sourirajan الذي كان يعمل حينئذ في برنامج أبحاث تنقية المياه المالحة بجامعة كاليفورنيا . وبالرغم من أن الأغشية التي يمكنها فصل الملح من الماء كانت معروفة من قبل ، إلا أن المعدلات المرتفعة نسبيا للترشيح – والتي يعتقد أنها تتم في طبقة سطحية كثيفة ورقيقة جداً من الغشاء بينما باقي الغشاء منفذ – ساعدت على نجاح هذه العملية عملياً صناعياً . وتُصنع هذه الأغشية بصبّ محلول يحوي أسيتات السليلوز ومكونات أخرى في وعاء مناسب ، ثم غمر هذا المحلول بالماء ، ثم تجفيف الغشاء الناتج عند درجة حرارة معينة وكلما ارتفعت درجة الحرارة هذه كلما ارتفعت القدرة على حجز الملح وقلّت نفاذية الغشاء .

ويوضح شكل (٩ – ٢) بعض الخطوات العملية اللازمة لفكرة التناضح العكسي . ففي العديد من أنواع الوحدات (شكل ٩ – ٢ أ ، ب ، جـ) يسري الماء الملح خلال أغشية أسطوانية معبأة داخل أنابيب مرنة . ويتجمع الماء الملح (النافذ) في مادة مسامية بين الغشاء والأنبوب حيث يمكنه السريان للخارج . ولقد استخدمت وحدات أسطوانية في محطة لمعالجة ماء الصرف الزراعي في فيربف بكاليفورنيا Firebaugh, California .

(أ)

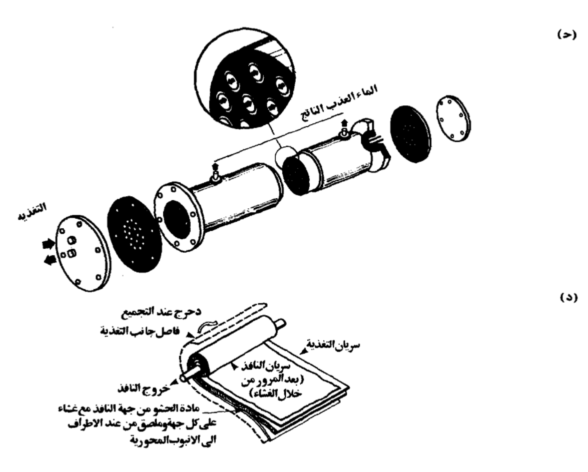
(ب)



شكل (٩ - ٢ أ ، ب)

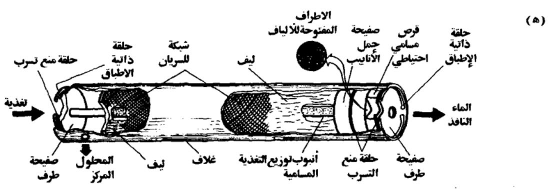
أنواع وحدات التناضح العكسي . (أ ، ب ، جـ) وحدات انبوبية ، تصميم لويب "Loeb" انظر "Desalination 1:35, 1966" قطاع أنبوبي حلزوني (شركة فيلكو وفورد "Philco-Ford Co., Newport Beatch, California بكاليفورنيا - عام ١٩٧٢) ، تصميم لوح الرمل "sand-log" انظر (مشروع الأغشية ، قسم انتقال الحرارة ، شركة وستنجهاوس الكهربائية ، بتسبرج ، بنسيلفانيا ، ١٩٧٣) ، على التوالي . في الوحدة الأخيرة تطمر أنابيب الغشاء في الرمل . (د) وحدة اللف الحلزوني (منتجات الزيوت المتحدة - روجا ، سان دييجو ، كاليفورنيا ، ١٩٦٦) . (هـ) وحدة الألياف المجوفة ، بيرماسب Permasep (شركة دي بونت دي نيمورس ، ويلمنجتون ، دلوار ، ١٩٦٧) . عن هاريس وآخرين .Harris *et al* (١٩٧٦) .

(جـ)



(د)

(هـ)



(شكل ٩ - ٢ جـ ، د ، هـ)

وتمتاز الوحدات الأسطوانية بسهولة تنظيفها ، إلا أن أهم عيوبها هو ارتفاع نسبة الحجم إلى مساحة السطح ، بينما يلزم نتيجة الضغط العالي (حوالي ٢٠ – ١٠٠ جوي) الذي يتعرض له الماء الملح أن يكون الحجم لسطح الغشاء أقل مايمكن . ولقد تطورت تصميمات اللف الحلزوني spiral-wound والألياف المجوفة hollow fiber لتلافي هذا العيب . ولإتمام اللف الحلزوني ، تُلف الأغشية والحشو حول أنبوب مجوف مركزي لتجميع الماء الناتج . وتسري تغذية الماء الملح خلال قنوات منفصلة في الاتجاه الموضح في شكل (٩ – ٢ د) . وتصنع الأغشية في العادة أيضاً من أسيتات السليولوز المعدلة ، ويُمكن بسهولة توصيل الوحدات المنفصلة على التوالي أو التوازي . أما في وحدات الألياف المجوفة الدقيقة (شكل ٩ – ٢ هـ) فإن عدداً هائلًا من الألياف المجوفة – أرفعُ من شعر الإنسان وأطرافها موضوعة في راتنج لاصق – تُحفظ معاً في وعاء ضغط . ويدور الماء الملح المضغوط خارج الألياف ، بينما يسري الماء العذب المرشح إلى الطرف المفتوح للألياف والمثبت في مكانه بالراتنج اللاصق . ويخرج الماء الملح من ملايين الفتحات في أطراف الأنسجة حيث يتم تجميعه . وتصنع الألياف المجوفة – بطرق مماثلة للطرق المتبعة في صناعات النسيج – من أسيتات السليلوز المعدل . ويُمكن أيضا أن تُصنع هذه الألياف من أنواع خاصة من النَّيْلون (مثل الوحدة المبينة في شكل ٩ – ٢ هـ) ، أو من بعض المواد الخاصة من أنواع متعدد الأميد polyamide والتي وجد أنها جميعا تفصل الملح عن الماء وتعطي معدلًا معقولًا من الترشيح .

ونظرا لأن فصل الملح من الماء بهذه الطريقة ماهو إلا عملية ترشيح جزيئي ، فإنه يجب توقع أن زيادة النفاذية في الطبقات الفعالة المتساوية للأغشية يلازمها انخفاض في حجز الملح بهذه الأغشية . وهذا في الواقع هو المعتاد ، إذ إن العديد من الطبقات الرقيقة المستخدمة للترشيح والتي ترسب من مواد مختلفة – مثل أحماض الدباليك على دعائم مسامية (أغشية دينامية dynamic membrane) – لها قدرة متوسطة على حجز الملح ، خاصة المياه منخفضة الملوحة . ومن جهة أخرى ، فإن الأغشية المصنوعة من أسيتات السليلوز المعدلة والأغشية المصنوعة من متعدد الأميد قد تطورت لترشيح ماء البحر ، ولكن نفاذية هذه الأغشية أقل من نفاذية الأغشية المصممة لإزالة ملوحة الماء الأخضم والذي يحتوي على بضعة آلاف من الأجزاء من الأملاح المذابة لكل مليون جزء .

وطبقا لخاصية الترشيح الجزيئي للأغشية ، فإن هذه الأغشية تتعرض للانسداد بالجسيمات الصغيرة للمواد المذابة في الماء – وحتى وإن صغرت هذه الجسيمات نسبياً – مما يقلل من معدلات إنتاجيتها ، وغالباً ما يُضعف قدرتها على حجز الملح أيضاً . لذا يلزم معالجة مياه التغذية عادة قبل تعريضها للأغشية . وتُعتبر معظم المياه السطحية ملوثة نسبياً ، مما يصعب معه ترشيحها مباشرة بالتناضح العكسي ، كما أن المياه الجوفية الشفافة تحتوي أيضا في الغالب على تركيز عالٍ من الكالسيوم أو أيونات تكوُّن القشور الأخرى ، مما يستلزم تيسير هذه المياه جزئيا لمنع ترسب المواد الذائبة في

هذه المياه على أسطح الأغشية . وتُستخدم الطرق التقليدية لمعالجة المياه (ومنها الطرق التي نوقشت في الفصل الرابع) في المعالجة الأولية للماء الخام . ومن المعتاد ترويق الماء بتيسيره بالجير ثم تخثيره coagulation ، ثم يتبع هذا الترشيح التقليدي . وتستخدم المعالجة بالكلور للأكسدة للتخلص من المواد العضوية والكائنات الحية المجهرية ، ولكن تلزم إزالة الكلور الزائد (على سبيل المثال بإضافة كميات ضئيلة من ثاني الكبريتيت إلى الماء الخام المعالج بالكلور) إذ إن الكثير من أغشية التناضح العكسي حساسة إلى تأثير الأكسدة للكور . (يمكن قياس ملاءمة المعالجة الأولية باستخدام الاختبار المعملي لانسداد المرشح ، ويُستخدم ورق ترشيح بمقاس اسمى قدره ٤٥ر٠ ميكرومتر – أي ٠٠٠٤٥ر مم – حيث يُمكن بدلالته تعيين دليل الانسداد .) وتؤخذ كل هذه الطرق للمعالجة الأولية في الاعتبار – والتي تطورت منذ زمن بعيد لمعالجة مياه البلدية ومياه الصناعة – وذلك عند تقدير تكاليف إزالة الملوحة بالتناضح العكسي .

التناضح العكسي لماء البحر

يمكن إزالة الملوحة (أو إعذاب) مياه البحر باستخدام مرحلتين للتناضح العكسي حيث يُمرر ماء البحر أولًا على غشاء ثم يمرر الناتج من هذا الغشاء على غشاء آخر للتناضح العكسي مرة أخرى . وتتبع هذه الطريقة نظراً لأن تركيز الملح الناتج في المرحلة الأولى يعتبر عالياً نسبياً للاستخدام العملي . ولقد تطورت صناعة الأغشية لتسمح بحجز نسبة كبيرة جداً من الملح ولتسمح أيضاً بإنتاج ماء عذب بتركيز ملوحة منخفض بالتمرير مرة واحدة على الغشاء (أي مرحلة واحدة) . ويُمكن لهذه الأغشية حجز ٩٩٪ من الملح . ويمكن الحصول على حجز هذه الكمية من الملح (أي ٩٩٪) وأكبر منها باستبدال الأغشية المصنوعة من أسيتات السليلوز والمستخدمة في التناضح العكسي للماء الأخضم بأغشية أخرى مصنوعة من خليط من ثنائي وثلاثي أسيتات السليلوز (أو ثلاثي الأسيتات النقي فقط) مع اختيار درجة حرارة طبخ الغشاء بدقة . وهناك بعض أنواع الأغشية المصنوعة من البلاميد يمكنها حجز الملح بنسبة تزيد ٩٩٪ . ويتم تصنيع هذه المواد من ألياف مجوفة دقيقة (شكل ٩ – ٢ هـ) أو على شكل رقائق مسطحة تلف على شكل حلزوني (شكل ٩ – ٢ د) . ويُمكن تكوين هذه الأغشية بالبلمرة لغشاء الترشيح على دعامة مسامية للغشاء . وتعتبر هذه الطريقة مفيدة جدا لأن مادتي الطبقة الرقيقة الفعالة والدعامة للغشاء لاتعتمدان على بعضهما البعض ، بينما في حالة أغشية أسيتات السليلوز يلزم أن يكون لمادتي الطبقة الرقيقة الفعالة والدعامة تركيب كيميائي متماثل حتى ولو كانت لهما مسامية مختلفة . بالإضافة إلى هذا ، يُمكن تخزين أغشية الطبقة الرقيقة المركبة في الأماكن الجافة بينما لايمكن أن تُخزن الأغشية المصنوعة من أسيتات السليلوز المعدلة في تلك الأماكن .

ونظرا لأن ضغط تناضح ماء البحر أعلا منه بكثير عن ضغط تناضح الماء الأخضم ، فإن

وحدات التناضح العكسي لماء البحر يجب أن تتحمل ضغوطاً أعلى . وفي العادة ، تحفظ هذه الوحدات داخل أوعية مصنوعة من الصوف الزجاجي القوي والمقوى بالبلاستيك والذي لايعاني من مشاكل التآكل . ولقد توفرت وحدات التناضح العكسي ذات الألياف الدقيقة المجوفة والوحدات ذات اللف الحلزوني على المستوى التجاري منذ عام ١٩٧٦ . ولم يمكن حتى الآن تحديد الحجم الأمثل لهذه الوحدات . وبعض الوحدات الموجودة في عام ١٩٧٦ يمكنها إنتاج مايصل إلى ٢٠ متراً مكعباً يوميا من الماء الناتج بالتناضح العكسي باستخدام ماء ملح بضغوط تتراوح من ٥٠ إلى ٧٠ جوي . وهذه الوحدات أسطوانية الشكل (القطر الخارجي يصل إلى ٢ر٠ متر) ويمكنها زيادة معدل إنتاج الماء العذب باستخدام ضغوط أعلى ، ولكن زيادة التكاليف وزيادة وزن الوحدات مع خفض معدل إنتاج الماء العذب لوحدة المساحات من الغشاء نتيجة دمج الغشاء (والتي تظهر بالخصوص في الأغشية المسطحة) تضع حداً أعلا للضغوط التي يمكن استخدامها . وقد يمكن أن يسترجع جزء كبير من الطاقة الميكانيكية من الماء الملح المرتفع الضغط إذا ماتم صرف هذا الماء الملح إلى الجو من خلال توربينات . وحتى إذا لم تُستخدم مثل هذه التوربينات ، فإن المستلزمات الفعلية من الطاقة الميكانيكية والكهربائية لإزالة ملوحة ماء البحر بالتناضح العكسي تكون في حدود ١٠ كيلووات ساعة لكل طن من الماء الناتج ، وهذا بالمقارنة مع ١ كيلووات ساعة لكل طن من الماء الناتج في عملية لامتناهية البطء (انظر ملحق ١ أ) . وهناك شك أن تتمكن أية عملية تُنتج ماءً عذباً بمعدلات مناسبة عملياً – بدون أن تحتاج هذه العملية إلى معدات كبيرة الحجم جداً – من العمل بكفاءة للقدرة أفضل من ١٠ كيلووات ساعة لكل طن من الماء الناتج .

وبمقارنة احتياجات الوقود لمحطات تقطير فجائي متعدد المراحل باحتياجات الوقود اللازم لإنتاج القدرة الكهربائية اللازمة لمحطة تناضح عكسي لها نفس معدل الإنتاج ، فإننا نجد أن احتياجات الوقود متساوية تقريبا في الحالتين . وقد يقل في حالة محطة التناضح العكسي . والتفضيل بين أي من المحطتين يعتمد على عوامل كثيرة ، وبالأخص على التكلفة المحلية وتوفر الوقود والقدرة . ولكن في بعض الأحيان الخاصة قد يجوز – خصوصا ما إذا كانت أغشية التناضح العكسي تصنع محليا – أن تصبح محطات إزالة ملوحة المياه بالتناضح العكسي بديلًا اقتصادياً جيداً لإعذاب المياه .

والآن في أواسط السبعينات* يبدو أنه مازال يمكن تحسين وتطوير كل من تصنيع أغشية للتناضح العكسي ذات كفاءة مرتفعة وتصميم وحدات التناضح العكسي بالرغم من التقدم الهائل

---

* المترجم : الآن في عام ١٩٨٥ أصبحت تقنية الأغشية متقدمة جدا . كما أصبحت هناك خبرة طويلة في إزالة الملوحة لمياه البحر باستخدام محطات التناضح العكسي . وتُعتبر محطة التناضح العكسي بجدة – المملكة العربية السعودية أول محطة تعمل بنجاح لإزالة ملوحة مياه البحر .

الذي تم في هذه الصناعة في الحقبة الأخيرة . ومازال هناك الكثير الذي يجب معرفته عن خطوات التشغيل لمحطات التناضح العكسي . وبالتأكيد ، يمكن عموما كسب خبرة أكبر عن طرق الأغشية عندما تعمل المحطة الكبيرة المتوقع بناؤها لخفض درجة الملوحة للرافد السفلي لنهر كولورادو وسوف تبني هذه المحطة بالقرب من يوما بولاية أريزونا ، تحت رعاية وزارة الداخلية بالولايات المتحدة . ومن المتوقع أن تنتج هذه المحطة مايزيد بقليل عن ١٠٠ مليون جالون (حوالي ٤٠٠ر٠٠٠ طن) من الماء منخفض الملوحة يوميا .

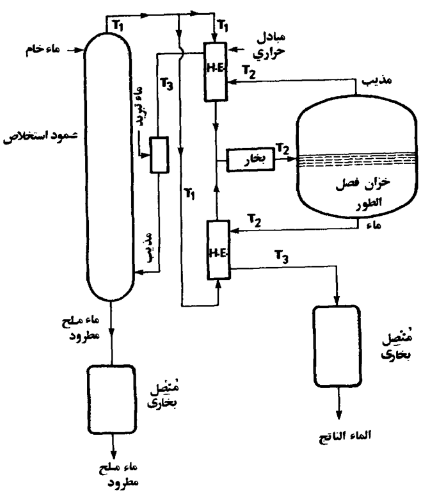
موضوعات متنوعة

هناك العديد من طرق إزالة الملوحة التي تم اختبارها معملياً ، ولأسباب مختلفة لم يتم تطويرها إلى أحجام كبيرة . وبالرغم من أن هذه الطرق لاتُعد منافسة للطرق الحالية ، إلا أن دراسة هذه الطرق تركز الانتباه على أساس المشكلة في كل حالة والتي يُحتمل التغلب عليها فيما بعد ، وذلك كما حدث غالباً في الماضي حيث تم إقصاء الكثير من الطرق جانباً لعدم توفر المادة اللازمة للتصنيع أو لعدم توفر التقنية اللازمة . ثم ازدهرت هذه الطرق مرة أخرى واستخدمت عندما توفرت المواد أو العمليات اللازمة لهذه الطرق . لذا يلزم التعرف على هذه الطرق ، وبعض منها سيناقش باختصار فيمايلي .

استخلاص المذيب

وُجد أن المذيبات العضوية يمكنها استخلاص الماء النقي من الماء الملح عند مدى معين من درجات الحرارة ، ثم تعطى هذا الماء النقي عند مدى آخر من درجات الحرارة . فعلى سبيل المثال ، يمكن للأمين ثلاثي الإثيل triethylamine أن يذيب حوالي ٣٠٪ بالوزن من الماء عند درجة ٢٠ م وحوالي ٥ر٢٪ فقط عند درجة ٥٠ م . وعليه ، فبتلامس الماء الملح وهذا المذيب عند وضع الاتزان في درجة حرارة ٢٠ م ، ثم بتسخين المذيب حتى درجة ٥٠ م ، فإن معظم الماء المستخلص سوف يترسب كطبقة منفصلة يمكن سحبها . ويحتوى الماء الناتج على حوالي ٣٪ من الأمينات التي يمكن إزالتها بالسريان في اتجاه معاكس مع بخار داخل عمود مخصص لذلك .

ويوضح شكل (٩ — ٣) الفكرة الأساسية لوحدة استخلاص المذيب . ولقد وجدت هذه الوحدة فيما مضى بمقاس صغير للاستخدام في المعامل فقط ، ولكن إذا تطلب الأمر بناء محطة إنتاجية ، فمن المتوقع أن تتبع بالتقريب نفس المسار الموضح في الرسم . ويعتبر عمود الاستخلاص هو قلب الوحدة وأهم جزء فيها حيث يسري الماء الملح البارد ملامساً سرياناً معاكساً من المذيب . ويُسخن المذيب والماء المحمول معه في مبادل حراري باستخدام كل من الماء العذب والمذيب المعاد



(شكل ٩ – ٣)

رسم تخطيطي لعملية استخلاص المذيب لإعذاب المياه المالحة . يسري ماء البحر الملح في اتجاه معاكس لسريان المذيب في عمود الاستخلاص . ويُسخَّن المذيب الحامل للماء والبخار مما يسبب ترسيب الماء . وتسترجع المُنفصِلات البخارية أجزاء المذيب المتبقية . الوحدات المكتوب عليها .H.E ترمز الى المبادلات الحرارية . يشير الرمز T إلى درجة الحرارة . عن هود ودافيسون Hood and Davison (١٩٦٠) .

للدوران من خزان فصل الطور ثم أخيراً بالبخار . ويُسبب ارتفاع درجة الحرارة في خزان فصل الطور ترسب الماء بالجاذبية .

ويمكن استرجاع الكمية الضئيلة المتبقية من المذيب في كل من الماء العذب والماء الملح المطرود من الوحدة بحقن بخار في أعمدة منفصلة تسمى مُنفصِلات بخارية* steam strippers . بالإضافة إلى

* المترجم : المُنفصِل البخاري عبارة عن وحدة تستخدم البخار لإزالة ماتبقى من المذيب في الماء العذب أو الماء الملح .

هذا ، كانت المذيبات المستخدمة في الماضي غير انتقائية للماء ، إذ تستخلص هذه المذيبات أيضاً بعض الأملاح وبالتالي لايمكنها إزالة الملوحة ازاله كاملة . ويمكن التغلب على بعض من هذه الصعوبات باستخدام مذيبات جديدة . ولربما يمكن استبدال المذيبات السائلة بأخرى صلبة . فمثلا ، يمكن لراتنجات التبادل الأيوني الجافة أن تَستخلِص الماء بمعدل أفضل من الملح . وفي هذه الحالة ، يمكن استرجاع الماء النقي جزئياً بتغيير درجة الحرارة . وهناك بعض أنواع المواد الصلبة المسماة براتنجات القفص الثعباني snake cage resins التي يُمكنها إزالة الأملاح بمعدل أفضل من الماء عند درجة حرارة الغرفة ، ويمكن استرجاع هذه الراتنجات عند درجات حرارة أعلا . ومن غير المهم على الإطلاق ما إذا كان الاستخلاص يتم عند درجة حرارة منخفضة عن درجة حرارة فصل الطور أو العكس .

تقطير الضغط الحرج

في تقطير الضغط الحرج ، يتم تقطير ماء البحر عند درجة حرارة وضغط مرتفعين ، بالقرب من النقطة الحرجة للماء (٣٧٤ درجة مئوية و ٢١٨ جوي) حيث تتساوى كثافة الماء النقي وكثافة بخار الماء بما يعادل ٤ر٠ جم/مل . وتحت هذه الظروف تصبح حرارة تبخير ماء البحر متناهية الصغر ، مما يعتبر مَيْزة بالمقارنة بحرارة التبخير بالقرب من الضغط الجوي ، حيث تكون هذه الحرارة كبيرة جدا . وبالطبع يلزم ضخ ماء البحر المستخدم لضغط مرتفع ثم تسخينه إلى درجة حرارة مرتفعة حيث تتم عملية التقطير . ويُمكن استرجاع جزءٍ من طاقة الضخ من خلال سريان الماء المقطر الناتج والماء الملح المطرود من الوحدة خلال توربينات مُتصلة مع مضخة التغذية . ويُمكن الحصول على مُعظم الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة تغذية ماء البحر في مبادلات حرارية تحمل سريانات معاكسة من الماء العذب والماء الملح المطرود من الوحدة . وتتمثل مشاكل هذه الطريقة للتقطير في التكاليف الباهظة لأثمان المعدات اللازمة للعمل عند ضغط ودرجة حرارة مرتفعين ، بالإضافة إلى تكاليف العزل الحراري والمشاكل الناجمة من تَكوُّن القشور والتآكل عند درجة الحرارة المرتفعة . ولقد حالت جميع هذه المشاكل دون تطوير هذه الطريقة للتقطير . ولم يتم تنفيذ هذه الطريقة عملياً بالرغم من وجود بعض الدراسات الأولية على بعض مراحل هذه الطريقة ، بالإضافة إلى وجود بعض دراسات الجدوى لها .

التناضح الأيوني وطرق أخرى

هناك العديد من العمليات التي اقترحت واختبرت معملياً ، مثل تجميد المنطقة ، والديلزة الكهربائية بالامتصاص المستحث كهربائيا على أقطاب مسامية ، والطرق الكيميائية لفصل الأملاح ،

وامتصاص الماء بمواد غير عضوية مُميئة ثم استرجاعه عند درجة حرارة أعلا من درجة حرارة الامتصاص ، واستخدام طرق بيولوجية تشمل استخدام الطحالب . وهناك طريقة أخرى اقترحت لإعذاب المياه تسمى التناضح الأيوني osmionis . ولقد سُميت الطريقة بهذا الاسم بعد دمج كلمتي تناضح osmosis وأيونات ions للإشارة إلى العملية الغشائية التي يسبب فيها انتشار الأيونات من محلول ملح مرتفع التركيز جداً إلى حجيرة ماءٍ أخضم ، نزع الملوحة من جزء آخر من ماءٍ أخضم من خلال تكوين مناسب لأغشية انتقائية منفذة . ويمكنك أن تجد معلومات عن هذه العمليات في التقارير الدورية السنوية الأولى لمكتب المياه الملحة بوزارة الداخلية بالولايات المتحدة الأمريكية .

مراجـع مختـارة

Harris, F.L., Humphreys, G.B., and Spiegler, K.S., "Reverse Osmosis (Hyperfiltration) in Water Desalination," Chapter 4 in *Membrane Separation Processes,* P. Meares, ed., Elsevier, Amsterdam, 1976.

Sourirajan, S., ed., *Reverse Osmosis,* Natl. Res. Council Canada, Ottawa, 1977.

Merten, U., ed., *Desalination by Reverse Osmosis,* M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1976.

Channabasappa, K.C., and Strobel, J.J., "Status of Sea-Water Reverse Osmosis Membrane Process Technology," *Proceedings of the International Symposium on Fresh Water from the Sea (Alghero),* Vol. 4, 1976, p.267, for sale by A.A. Delyannis and A.E. Delyannis, Tsaldari St. 34, Athens-Amaroussion, Greece. This article also deals with the definition of the "plugging index" and with description of the equipment for its measurement.

Dow Chemical Co., Permselective Hollow Fibers and Method of Making Them. *U.S. Patent* 3, 423, 491 (1966).

E.I. DuPont de Nemours & Co., Reverse-Osmosis Separations Using a Treated Polyamide Membrane, *U.S. Patent* 3, 551, 331 (1971).

Taylor, I.G., and Haugseth, L.A., "Yuma Desalting Plant Design," *Proceedings of the First Desalination Congress of the American Continent (Mexico City),* Vol.1, Elsevier, Amsterdam, 1976, p.V-4.

Lazare, L., Process for Reducing Salt Content of Salt-Containing Water, *U.S. Patent* 3,386,913 (June 4, 1968). Solvent extraction.

Hood, D.W., and Davison, R.R., "The Place of Solvent Extraction in Saline Water Conversion," *Advances in Chemistry Series,* No.27, American Chemical Society, Washington, D.C., 1960, p.40.

McKelvey, J.G., Spiegler, K.S., and Wyllie, M.R.J., "Salt Filtering by Ion-Exchange Grains and Membranes," *J. Phys. Chem.* **61**:174 (1957). Early experiments on use of synthetic ion-exchange membranes for hyperfiltration; absorption of fresh water by ion-exchange granules and recovery by squeezing.

Hatch, M.J., Dillon, J.A., and Smith, H.B., "Preparation and Use of Snake-Cage Polyelectrolytes," *Ind. Eng. Chem.* **49**:1812 (1957).

Riley, R.L., Fox, R.L., Lyons, C.R., Milstead, C.E., Seroy, M.W., and Tagami, M., "Spiral-Wound Poly (Ether/Amide) Thin-Film Composite Membrane Systems," *Proceedings of the First Desalination Congress of the American Continent (Mexico City),* Vol. 1, Elsevier, Amsterdam, 1976, p.II-1.

Glueckstern, P., and Greenberger, M., "Field Tests and Engineering Evaluation of Commercial Reverse-Osmosis Units for Brakish-Water Desalting," *Proceedings of the International Symposium on Fresh Water from the Sea (Alghero)*, Vol.4, 1976, p.301, for sale by A.A. Delyannis and A.E. Delyannis, Tsaldari St. 34, Athens-Amaroussion, Greece.

١٠ ملخص واستنتاجات

■ مقارنة طرق إزالة ملوحة الماء ■ أيهما أجدى ، نقل الماء أم تنقية الماء الملح ؟ ■ مراجع مختارة

مقارنة طرق إزالة ملوحة المياه

يجب على المخطط المهتم بزيادة موارد المياه لمنطقة ما ، أن يحدد أولا أيهما أجدى : تنقية المياه الملحة ، أم نقل المياه العذبة من أقرب منبع لها إلى المنطقة . ويعتمد هذا القرار على مقارنة تكلفة المعالجة وتكلفة النقل .

وكنتيجة للتفاوت الكبير في تكلفة الوقود والمواد الخام والعمالة ، فإنه يصبح من الصعب تقديم قواعد عامة لتحديد تكلفة معدات إزالة الملوحة وتشغيلها . وبالإضافة لهذا ، فإن الدعم الحكومي الذي يُمنح عادة لأعمال المياه يجعل من الصعب مقارنة تكاليف إزالة ملوحة المياه بتكاليف نقل المياه العذبة .

أما في المناطق التي يتوفر بها ماء البحر فقط ، فإن تفضيل أي من طرق إزالة الملوحة يعتمد أساساً على الوقود والطاقة المتوفرة محليا . فإذا كانت تكاليف الوقود منخفضة نسبيا ، أو إذا توفر البخار ، فإن التقطير يُصبح عادة أفضل اقتصاديا من نقل المياه العذبة . وبالرجوع إلى تكلفة إزالة ملوحة المياه في أوائل السبعينيات ، فإننا نجد أن محطة إزالة ملوحة بطاقة إنتاجية قدرها ١٥٠٠٠ طن يومياً من الماء العذب تُكلف ما يربو على عشرة مليون من الدولارات ، مما يعني أن رأس المال المطلوب لكل طن من الماء العذب الناتج يومياً يعادل ٦٥٠ دولاراً . ومحطة إزالة ملوحة المياه بالتبخير الفجائي المتعدد المراحل ، التي أنشئت في عام ١٩٧٦ بهونغ كونغ ، بطاقة إنتاجية قدرها ١٩٠٠٠٠ طن يوميا* ، يقدر رأس مالها بحوالي ٩٢ مليون دولار ، أي حوالي ٤٨٦ دولاراً لكل

* يقصد باستخدام وحدة الطن المستخدمة الطن المتري أي ١ متر مكعب وزنا من الماء النقي ، ١ كيلو جالون = ١٠٠٠ جالون أمريكي .

طن يوميا ، أو حوالي ١٫٨٧ دولارا لكل جالون يومياً . وتزيد تكاليف وحدات التقطير الجديدة بهونج كونج بحوالي ٦٠٪ على الأقل . وتقدر التكلفة الكلية لإعذاب المياه الملحة بهونج كونج بحوالي ٢٫٦٧ دولار لكل كيلو جالون ، بينما تصل تكلفة الوحدات الجديدة بالولايات المتحدة إلى أكثر من ٣ دولارات لكل كيلو جالون . أما في الوحدات الصغيرة (طاقة إنتاجية في حدود ٣٧٨٥ - ٩٥٠٠ طن يومياً ، أي مايعادل ١ - ٢٫٥ مليون جالون يومياً*) فإن التكلفة الكلية تزيد عن ذلك .

ومن المثير ، مقارنة تكاليف عام ١٩٧٦ لوحدات إزالة ملوحة المياه بالتقطير بتقديرات إزالة ملوحة المياه بالتناضح العكسي ، بالرغم من عدم تساوي نوعية الماء المنتج في الحالتين ؛ تعطي عملية التقطير عملياً ماءً خالياً من الأملاح ، بينما يحتوي الناتج من التناضح العكسي في العادة على عدة مئات من أجزاء الملح في المليون** . ففي حالة محطة لمعالجة ماء البحر بالتناضح العكسي بطاقة يومية قدرها ٣٧٨٥ متراً مكعباً (أي مليون جالون يوميا) كان رأس المال المستثمر مقدراً بحوالي ١٧٨٠٠٠٠ دولارا (أي مايعادل ٤٧٠ دولارا لكل طن يوميا = ١٫٧٨ دولارا لكل جالون يوميا) وكانت التكاليف (شاملة عائد رأس المال) حوالي ٤٧٫٥ سنت لكل طن (أي ١٫٨٠ دولار/كيلو جالون) . (هذا التقدير على أساس عائد رأس المال وضرائب حوالي ٨٪ و ١٪ سنويا على الترتيب ، وطاقة كهربائية بسعر ٢ سنت/كيلو وات - ساعة وغشاء ذي عمر افتراضي ٣ سنوات وضغط الماء الملح ٥٥ ضغطاً جوياً واسترجاع للطاقة الميكانيكية من الماء الملح المطرود .) وبينما لايمكن مقارنة هذه التكاليف للتقطير والتناضح العكسي مباشرة ، نتيجة لاختلاف الحجم الإنتاجي للوحدة - المقارنة مبنية على أسس أخرى ليست متماثلة تماما ، فالعوامل الكثيرة المهمة محلياً والمنافسة التجارية الدولية والتي (تتغير مع الموقع الجغرافي للوحدات) تُعتبر ذات أهمية أساسية هنا - إلا أن الأرقام تعطي القارىء فكرة عن رأس المال المطلوب وعن تكلفة تشغيل وحدات إعذاب مياه البحر في عام ١٩٧٦ . وتوضح الأرقام أيضاً أنه في عام ١٩٧٦ كانت تكاليف إزالة ملوحة المياه بالتقطير مساوية لتكاليف الإعذاب بالتناضح العكسي ، إلا أن إزالة الملوحة بالتقطير هى الطريقة التي كانت تستخدم فيما مضى .

وبصفة عامة ، تُعتبر تكلفة إزالة ملوحة الماء الأخضم أقل من تكلفة إزالة ملوحة ماء البحر ، مما يجعل طرق الأغشية أجدى اقتصاديا من طرق التقطير في هذه الحالة . (يلاحظ - بالرغم من

---

* ١ مليون جالون يوميا = ١ مليون جالون أمريكي يوميا = ٣٧٨٥ طن يوميا .

** يمكن تقدير تكلفة إزالة الملوحة - في بعض الأحيان - بدلالة عدد أطنان الملح المزال من المياه الملحة بدلا من تقدير التكاليف بدلالة أطنان الماء العذب المنتج .

ذلك – أن تكلفة صرف الماء الملح في المناطق البعيدة عن الشواطىء تكون عموما أعلى من مثيلتها على الشواطىء .) ولكثير من أنواع المياه تتساوى تكاليف كلٍ من الديلزة الكهربائية والتناضح العكسي ، ويعتمد التفضيل بين الطريقتين على مكونات الماء الخام وعلى عوامل محلية أخرى . ولقد قدِّر رأس مال محطة إزالة ملوحة غشائية كبيرة صمِّمت في منطقة يوما بأريزونا (الطاقة الإنتاجية أكبر قليلًا من ٣٧٨٥٠٠ طن مياه عذبة يومياً = ١٠٠ مليون جالون يوميا) – حيث يجب أن تنخفض ملوحة مياه الصرف الزراعي لِولتن موهاك Welton-Mohawk من حوالي ٣٢٠٠ إلى ٣٨٦ جزءاً في المليون – بحوالي ١٤٩٤٦٠٠٠٠ دولار أي حوالي ٣٩٥ دولار/طن يوميا من الناتج (ويمثل ٣٧٪ من هذه القيمة تكلفة معدات المعالجة الأولية) وتكلفة الماء المحلي ٢ر١٦ سنت/طن (= ٣ر٦١ سنت/كيلو جالون = ١٩٨ دولار/فدان – قدم) . وبالرغم من أن هذا التقدير مبنى على معدل عائد منخفض لرأس المال (= ٦٢٥ر٥٪) ولايشمل تكلفة صرف الماء الملح – أي تكلفة بناء وصيانة قناة خاصة لصرف الماء الملح إلى خليج كاليفورنيا – إلا أنه يوضح أن تكلفة معالجة الماء الأخضم تقل عن تكلفة معالجة ماء البحر ، وهذا يمكن توقعه من اعتبارات احتياجات القدرة (الفصل الثالث الملحق ١ أ) .

أما الهدف الرئيس من هذه البيانات ، فهو تقديم فكرة تقريبية عن رأس المال وتكاليف التشغيل المطلوبة لمحطات إزالة الملوحة . بالطبع فإنه من الخطأ اختيار عملية إعذاب معينة على أساس تفضيل المِّيزة الاقتصادية وحدها . فعلى سبيل المثال ، فإن رأس المال اللازم لمقطر فجائي متعدد المراحل بطاقة إنتاجية ٤٠٠٠ متر مكعب يومياً ، يكون أكبر من رأس مال مقطر انضغاط له نفس الطاقة الإنتاجية . ولايعني هذا بالضرورة أن تكلفة المياه المنتجة بالطريقة الأخيرة أقل منها في الأولى ، اذ يمكن لوحدات التبخير الفجائي استخدام بخار عند ضغط منخفض بدلًا من القدرة الكهربائية أو البخار عند ضغط مرتفع اللازمين لمقطر انضغاط . هذا العامل يمكن اعتباره أكثر أهمية من الفرق في رأس المال في المناطق التي يتوفر بها بخار عند ضغط منخفض . وتلعب أيضا كمية المياه المطلوب إنتاجها دوراً هاماً في اتخاذ القرار . وبالتأكيد يصبح غير جدير بالاهتمام إنشاء مقطر متعدد التأثيرات لإنتاج عدة مئات من اللترات من الماء العذب يوميا في مكانٍ ناءٍ . ويمكن لوحدة غشائية أن تكون أكثر ملاءمة في مثل هذه الأحوال ، وحتى المقطرات الشمسية قد تكون ملائمة ، إذ إن المقطرات المتعددة التأثيرات لايمكن تصغيرها إلى وحدات صغيرة الحجم جدا . وتحدد ملوحة الماء الخام والسِّعر النسبي للبخار وللقدرة الكهربائية اختيار وحدة إزالة الملوحة . وإذا كان لابد من توليد بخار للاستخدام في وحدة إزالة الملوحة ، فيجب أن نتذكر أن الطن الواحد من الوقود يمكن أن يُولِّد من ١٠ إلى ١٧ طناً من البخار اعتماداً على نوع الغلاية وضغط البخار اللازم . وليس من المعتاد أن تختلف كميات الطاقة المتوفرة وتكاليف رأس المال اختلافا جوهريا في الأماكن المختلفة من العالم ، ولكن تكاليف وحدة معالجة الماء تعتمد ، إلى حدٍ بعيد ، على التكلفة المحلية لوحدة الطاقة المتاحة

وعائد رأس المال ومعدلات التأمين . أما تكلفة العمالة فهى غير هامة في المحطات الكبيرة الأوتوماتية ويندر أن تزيد تكلفتها عن ١٠٪ من تكلفة الماء .

من الصعب استنباط كيفية تَغيُّر تكاليف إزالة الملوحة في المستقبل . فمثلا ، في عام ١٩٧٥ ، كانت محطات إزالة الملوحة تتكون من مجموعات من وحدات صغيرة الحجم متماثلة تقريبا . وفي مثل هذه الحالة ، فإنه من غير المحتمل أن تنخفض تكلفة رأس المال اللازم لإنتاج متر مكعب يومياً من الماء العذب بزيادة الإنتاج ، إذ تتساوى تقريبا تكلفة وحدة كبيرة مع تكلفة مجموعة من الوحدات الصغيرة . ولكن ، طبعا ، إذا استخدمت تصميمات جديدة مختلفة جذريا للمحطات الكبيرة ، فإنه يُمكن تصور انخفاض قيمة رأس المال لوحدة الماء الناتج انخفاضاً ملموساً .

أما في حالة الزراعة ، فلا يوجد حالياً أية طريقة يمكنها جعل تكلفة تنقية الماء مناسبة اقتصاديا لري المحاصيل الزراعية . فعند غياب المطر كلياً ، ينتج المتر المكعب من ماء الري حوالي ٣ كجم برتقال (حوالي ١٠ برتقالات متوسطة الحجم) أو حبوباً كافية لسبع شرائح من الخبز . وحتى إذا أمكن خفض تكلفة تنقية الماء إلى ١٥ سنت/متر مكعب فإن هذه التكلفة ماتزال أعلا من المعدلات القياسية الحالية . وعليه ، يكون من الأجدى اقتصاديا نقل المنتجات الزراعية إلى المناطق التي تحتوي على ماءٍ عذب ، بدلا من الزراعة في هذه المناطق بإزالة ملوحة ماء البحر ، إلا إذا حدث اكتشاف هام في طرق إعذاب الماء أو في طرق الزراعة . ومن هذا المنطلق ، فإن اقتصاديات إزالة ملوحة الماء ترتبط بتنمية وسائل النقل وتطويرها .

أيهما أجدى ، نقل الماء العذب أم تنقية الماء الملح ؟

في بعض الحالات يكون الاختيار بين هذين البديلين واضحاً . ولكن في حالات أخرى ، لايكون هناك أي حل سوى اختيار أجدى طريقة اقتصاديا لإزالة الملوحة إذا لم تكن هناك أية مصادر للماء العذب على مسافة مئات من الأميال أو أن تُملي الاعتبارات التجارية أو السياسية أو العسكرية إنشاء منطقة عمرانية في مكان لايتوفر فيه سوى الماء الملح . ولقد تحقق هذا بالفعل فى أماكن مثل أروبا والكويت وإيلات وفي مناطق أخرى نائية . وقد يتوفر الماء العذب على بعد ما ، ولكن في هذه الحالة تلزم الإجابة على السؤال التالي : أيهما أجدى اقتصاديا إحضار الماء العذب من منطقة بعيدة أم إعذاب الماء محليا ؟

وتعتمد الإجابة على هذا السؤال على الموقع الجغرافي للمنطقة ، وبُعدُها عن أقرب منطقة لمصادر الماء العذب والماء الملح ، وتكاليف وتوفر معدات صرف المخلفات ، وخطط التنمية المستقبلية لمواقع الماء العذب والملح والتي تؤثر على موارد المياه والطلب عليها ، وعلى مؤثرات أخرى عديدة . ولاتوجد أية إجابة قياسية ولكن يجب دراسة كل حالة على حدة .

تعميم واحد يمكن مراعاته ، على أي حال ، وهو أنه إذا قلّت كمية الماء المطلوبة يومياً ، يصبح نقل الماء العذب من منطقة بعيدة غير مجدٍ اقتصادياً بالمقارنة مع تنقية الماء الملح محلياً . هذا لأن تكلفة بناء خطوط المواسير والقنوات الاصطناعية ، لوحدة المياه ، في الأقطار الصغيرة أكبر منها في الأقطار الكبيرة .

وتشمل التكاليف الأساسية لتوفير الماء التقليدي على الآتى :

١ – مصاريف رأس المال وتكلفة تشغيل خطوط المواسير والقنوات الاصطناعية .

٢ – تكاليف الخزانات ومستودعات تخزين الماء لضمان معدل استخدام ثابت للماء بالرغم من التذبذب في مورد الماء الخام . ويسمى هذا بتكلفة التخزين .

٣ – تكلفة المعالجة والتي يجب أن تُؤخذ في الاعتبار إذ إن تنقية ماء البحر تُعطى عموماً ماءً نقياً أما المياه الأخرى فغالباً ماتحتاج إلى معالجة مثل الترشيح وإزالة العسر .

٤ – رأس مال وتكلفة تشغيل الآبار عندما يكون مصدر الماء العذب هو المياه الجوفية .

مجموع هذه التكاليف ، والتي لاتوجد في حالة إزالة ملوحة ماء البحر ، مطروحا منها أية تكاليف إضافية ناشئة عن عملية إزالة الملوحة ، تعرف بتكلفة التعادل (أي بدون ربح أو خسارة) أي أعلا تكلفة يمكن اعتبارها لتنقية المياه بحيث تكون مماثلة اقتصاديا لمصادر المياه التقليدية .

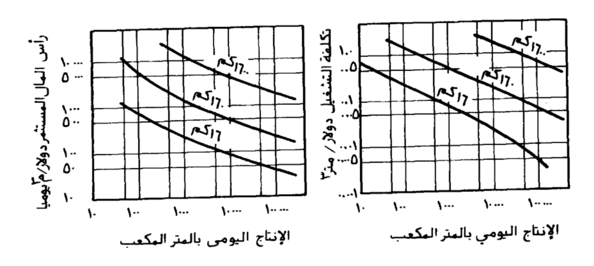
كمثال لهذه النوعية من التحليلات ، يمثل شكل (١٠ – ١) تكلفة التعادل لمياه البلدية . وتمثل هذه التكاليف تكاليف خطوط الأنابيب والقنوات الاصطناعية لنقل الماء إلى المدينة ، بالإضافة إلى تكاليف بعض الوسائل القليلة للمعالجة مثل الترشيح فقط وبفرض عدم ضرورة تجميع الماء وتخزينه . كما لايشتمل الشكل على تكاليف نظام التوزيع .

ويوضح الشكل الزيادة السريعة في التكاليف مع (١) قلة الإنتاج اليومي ، (٢) بعد مسافة مصدر الماء العذب . فإذا كانت المسافة إلى مصدر الماء العذب حوالي ١٦٠ كم ، فإن تكلفة رأس المال اللازم لتوريد ١٠٠٠٠٠ متر مكعب من الماء تكون أقل من تكلفة تنقية ماء البحر . أما إذا كان الاحتياج اليومي حوالي ١٠٠٠ متر مكعب فقط ، فإنه يُصبح من الأفضل اقتصاديا لمنطقة ساحلية أن تُنقي ماء البحر بدلًا من إحضار ماء عذب من مسافة ١٦٠ كم .

وتُوجد بيانات مماثلة لحالات ما إذا كان تجميع الماء وتخزينه ضروريا أو إذا كانت المقارنة لاتشمل معالجة الماء . وفي الحالة الأخيرة ، فإن تكلفة التعادل تقل بالتقريب بمقدار يتراوح بين نصف القيمة وثلثيها .

وسواء نقل الماء العذب من مناطق غنية به أو أنتج من ماء المحيط فسيبقى الماء العذب دعامة أساسية في حضارة الإنسان ، بالإضافة إلى الاعتماد الحرج لإرادة الإنسان على كفاية مصادر الماء

لاحتياجاته . وسوف يتطلب اتساع وانتشار حضارتنا كفاءة أعلا لتنقية الماء الملح في المناطق المحرومة من هذا السائل الحيوي ، بالإضافة إلى زيادة المعرفة والتدريب على تنقية الماء الملح .



شكل (١٠ - ١)

تكاليف رأس المال المستثمر والتشغيل للنظم التقليدية لموارد الماء البلدية . وتمثل التكاليف الموقعة ، التكاليف بدون مكسب أو خسارة لعام ١٩٦٠ لتحويل الماء الملح إلى ماء عذب (أعلا تكاليف يمكن عندها أن تُنافس إزالة ملوحة الماء الملح تكاليف الطرق الأخرى التقليدية لتوريد الماء) . ومعظم بنود هذه التكاليف هى النقل بخطوط الأنابيب والترشيح . وتمثل المنحنيات المختلفة مسافات مختلفة (بالكيلو متر) من منابع الماء إلى محطة البلدية . وتقل التكاليف بزيادة حجم التشغيل حيث يصبح أقل تكلفة نسبيا أن تبنى وتشغل خطوط أنابيب وشبكات أنابيب كبيرة عنها في الصغيرة . لاحظ أن قياسات الرسم لوغاريتمية . عن كونينج Koening (١٩٥٩) .

مراجع مختارة

English, J.M., and El-Ramly, N.A., "Economic Evaluation of Desalting Subsystem as a Part of the Total Water System," *Desalination* **3**:308 (1967).

Koenig, L., "Economic Boundaries of Saline-Water Conversion," *J.Am. Water Works Assoc.* **51**:845 (1959).

Skrinde, R.T., and Tang, T.L., "Operating Results of Electrodialysis and Reverse-Osmosis Municipal Desalting Plants," *J.Nat. Water Supply Improvement Assoc.* **1**:15 (1974).

Channabasappa, K.C., and Strobel, J.J., "Status of Sea-Water Revers Osmosis Membrane Process Technology," *Proceedings of the Fifth International Symposium of Fresh Water from the Sea (Alghero, Sardinia),* Vol.4, 1976, p.267, for sale by A.A. and A.E. Delyannis, Tsaldari St. 34, Athens-Amaroussion, Greece. This article contains tables of operating costs for both distillation and sea-water reverse osmosis, the latter with break-down of costs into different categories.

Roberts, E.B., and Hagan, R.M., *Energy Requirements of Alternatives in Water Supply, Use and Conservation: A Preliminary Report,* Contribution No.155, California Water Resources Center, University of California, Davis, 1975.

Taylor, I.G., and Haugseth, L.A., "Yuma Desalting Plant Design," *Proceedings of the First Desalination Congress of the American Continent (Mexico City),* Vol.1, Elsevier, Amsterdam, 1976, p. V-4.

Drake, F.A., "Desalting in Hong Kong. The First Phase," *Desalination* **18**:1 (1976).

الملاحق

ملحق ١ أ
الحد الأدنى للقدرة اللازمة
لفصل ماء البحر إلى ماء عذب وماء ملح

كان استنباط الحد الأدنى للطاقة الحرة لإزالة الملوحة من ماء البحر الموضح في فصل (٣) استنباطاً يؤدي إلى قيمة تقريبية بإجراء أقل قدر ممكن من الحسابات . أما هنا ، فسوف نعطي معالجة عامة تفصيلية لهذا الموضوع .

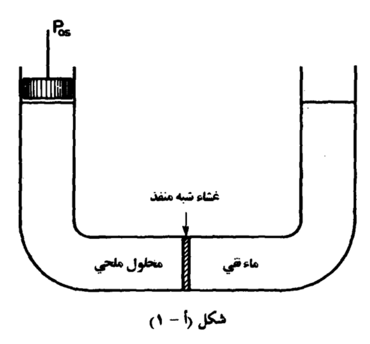
تعتبر الطاقة اللازمة لفصل الماء الملح إلى ماء عذب وآخر ملح طاقة مستفادة . ولايبدو للوهلة الأولى ، في العادة ضرورة الاحتياج لطاقة مستفادة إذ إن التقطير لايحتاج إلى استخدام طاقة ميكانيكية أو كهربائية ، وإنما يحتاج لانتقال الحرارة من درجة مرتفعة في الغلاية إلى درجة حرارة منخفضة في المُكثِّف . ولكن يمكن بالطبع استخدام هذه الحرارة لإنتاج شغل ميكانيكي يعادل قيمة الطاقة المستفادة .

دعنا نأخذ حجيرتين تحتويان على ماء ملح وآخر عذب على التوالي ومنفصلتين بغشاء مُنفذ للماء دون الملح (شكل أ – ١) . وكما هو موضح في فصل (٩) هناك بعض الأغشية المتوفرة صناعياً والتي تشابه إلى حد كبير هذا الغشاء المثالي . وعند حالة الاتزان يلزم تطبيق ضغط مرتفع نسبيا على المحلول الملحي لمنع انتشار الماء العذب من خلال الغشاء إلى المحلول الملحي مؤدياً إلى تخفيفه . ويسمى هذا الضغط بضغط التناضح ويرمز له بالرمز P_{os} .

ومن المفيد التعبير عن ضغط التناضح بدلالة فعالية الماء في المحلول . فبالرجوع إلى المبادىء الأولية للكيمياء والديناميكا الحرارية ، فإنه من المعلوم أنه يستدل على الجهد الكيميائي μ للماء في محلول ما بالمعادلة العامة الآتية :

$$\mu = \mu_0 + P\bar{v} + RT \ln a \qquad (1)$$

حيث μ_0 هو الجهد الكيميائي للماء النقي عند واحد ضغط جوي ، P هو الضغط الزائد عن واحد ضغط جوي والذي يؤثر على المحلول ، $\bar{v}$ هى حجم الوزن الجزيئي الجرامي للماء ، و T هى درجة الحرارة المطلقة ، و a هى فعالية الماء . وحيث إن الماء الموجود عند طرفي سطح الغشاء يكون في حالة اتزان ، فإن الجهد الكيميائي للماء يتساوى عند جهتي الغشاء :



شكل (أ - ١)

الاتزان التناضحي عبر غشاء شبه منفذ (غشاء منفذ للماء دون الملح)

$$\mu_0 + P_{os}\bar{v} + RT \ln a = \mu_0 \tag{2}$$

$$P_{os} = -\frac{RT}{\bar{v}} \ln a \tag{3}$$

ولفصل الماء العذب من المحلول الملحي نبدأ الآن في زيادة الضغط على المحلول الملحي ، على أن يتم هذا تحت ظروف انعكاسية . وعليه يجب أن يزيد الضغط المستخدم عن ضغط التناضح بمقدار متناهٍ في الصغر . ويتم تحت هذه الظروف رفع حجم قدره dv خلال الغشاء ، ولكن نظراً للزيادة المصاحبة في التركيز وبالتالي في ضغط تناضح المحلول ، فإنه يلزم زيادة الضغط المستخدم مرة أخرى . وبناء على ذلك ، يزداد كل من تركيز المحلول والضغط المستخدم تدريجيا حتى يتم دفع الكمية المطلوبة من الماء العذب خلال الغشاء .

وفي كل خطوة انضغاط متناهية الصغر ، يقدر الشغل dW كالتالي

$$dW = P_{os}\, dv \tag{4}$$

فإذا كان الحجم الابتدائي v_1 لتر والحجم النهائي v_2 لتر ، فإن الشغل الكلي* لكل لتر من الماء العذب المنتج يصبح

$$W = \frac{1}{v_1 - v_2} \int_{v_1}^{v_2} P_{os}\, dv = \frac{-RT}{(v_1 - v_2)\bar{v}} \int_{v_1}^{v_2} \ln a\, dv \qquad (5)$$

ولإجراء التكامل يلزم التعبير عن a بدلالة v . وتعرف الفعالية كالي

$$a \equiv \frac{p}{p_0} \qquad (6)$$

حيث P و P_0 هما ضغطا اتزان بخار الماء فوق الماء النقي والمحلول ، على التوالي . وطبقا لتجارب كثيرة (انظر H.Sverdrup *et. al., The Oceans,* Prentice-Hall, New York, 1946) فإن ضغط بخار ماء البحر ينخفض بزيادة الملوحة S كما هو موضح بالمعادلة

$$p = p_0(1 - AS) \qquad (7)$$

حيث إن قيمة الثابت A هي ٥٣٧ ٠٠٠ر٠ .

ومن المعادلات (٥) ، (٦) ، (٧) فإن

$$W = \frac{-RT}{\bar{v}(v_1 - v_2)} \int_{v_1}^{v_2} \ln(1 - AS)\, dv = \frac{ART}{\bar{v}(v_1 - v_2)} \int_{v_1}^{v_2} S\, dv \qquad (8)$$

حيث AS صغيرة بالمقارنة إلى الواحد الصحيح .

ونظراً لعدم نفاذ الملح من الغشاء ، فإن كمية الملح Sv في حجيرة الماء الملح (والتي تحتوي على حجم من المحلول قدره v) تبقى ثابتة من البداية وحتى انتهاء عملية الانضغاط . وفي الأصل ، فإن هذه الكمية من الملح تساوي حاصل ضرب الملوحة الابتدائية S_1 مع الوزن ، وبالتقريب يمكن اعتبارها حاصل ضرب الملوحة في الحجم (بدلا من حاصل ضرب الملوحة في الوزن) :

$$Sv = S_1 v_1 \qquad (9)$$

* يؤخذ الشغل المنتج من نظام ما موجبا ، بينما يؤخذ الشغل المبذول بالنظام سالباً . وهذه القاعدة للإشارات أُخذت في الاعتبار في معادلة (٤) لأن dv، تمثل التغير في حجم المحلول ، وهو مقدار سالب [يتناقص حجم المحلول الموجود في الجهة اليسرى من شكل (أ - ١) باستمرار مع الانضغاط ($v_2 < v_1$)].

ومن المعادلتين (٨) و (٩) ينتج أن

$$W = \frac{-ARTS_1\nu_1}{\bar{\nu}(\nu_2 - \nu_1)} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{d\nu}{\nu} = \left(\frac{ARTS_1}{\bar{\nu}}\right) \left(\frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \ln \frac{\nu_2}{\nu_1}\right) \qquad (10)$$

فإذا كانت ν_2 أقل من ν_1 فإن الحد اللوغاريتمي يمكن تحويله إلى حد أكثر تبسيطاً كالتالي

$$\ln \frac{\nu_2}{\nu_1} = \ln \left(1 - \frac{\nu_1 - \nu_2}{\nu_1}\right) = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_1} \qquad (11)$$

أي أن

$$\lim W = \frac{-ARTS_1}{\bar{\nu}} \qquad \text{for } (\nu_1 - \nu_2) \rightarrow 0 \qquad (12)$$

وهذا هو الشغل المستهلك* لكل لتر ماء عذب منتج بترشيح ماء البحر على دفعات صغيرة خلال الغشاء . ويمثل هذا الشغل الحد الأدنى لاحتياجات الطاقة . وتوضح المعادلة (١٠) أنه عند درجات أعلى من التركيز تصبح قيمة الشغل أكبر لأن قيمة الحدود الموجودة بين المجموعة الثانية من الأقواس تصبح أكبر من الواحد الصحيح .

وبأخذ S = ٣٤٫٣٪ و ν = ٠٫٠١٨ لتر/جزىء جرامي ، T = ٢٩٨ درجة مطلقة (أي ٢٥ درجة مئوية) وبأخذ قيمة R تعادل ٢٫٣١ × ١٠^-٦ كيلووات ساعة لكل درجة مئوية لكل جزىء جرامي فإننا نحصل على الآتى

$$\lim W = -7.0 \times 10^{-4} \text{ kwhr/liter}$$

أي مايعادل ٠٫٧ كيلووات ساعة لكل متر مكعب . ومن المعادلة (١٠) يصبح الحد الأدنى للشغل (الطاقة الحرة) اللازم لإنتاج متر مكعب من الماء هو

$$= -0.70 \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \ln \frac{\nu_1}{\nu_2}$$

ويوضح الجدول (أ – ١) قيم الحد الأدنى للشغل لفصل الماء بدرجات مختلفة من المحلول الأصلي (أي بتركيز المحلول المتبقى إلى درجات مختلفة) بشرط أن تتم كل خطوة من عملية نزع الملح بطريقة مثالية عكسية .

---

* نظرا لأن الشغل W يستهلك بدلا من أن ينتج من النظام فإن قيمة W المحسوبة من معادلة (١٢) تصبح سالبة .

جدول أ - ١

الحد الأدنى للطاقة الحرة (الشغل) لإنتاج
ماء عذب من ماء بحر بملوحة ٣٤ر٤٪ عند
٢٥ درجة مئوية (كيلووات - ساعة/متر٣
من الماء العذب)

الحجم الابتدائي v_1	١	١	١	١	١
الحجم النهائي v_2	٠ر٩٩	٠ر ٧	٠ر ٥	٠ر٣٣	٠ر٢٥
$\frac{v_1}{v_1 - v_2} \ln \frac{v_1}{v_2}$	١	١ر١٩	١ر٣٨	١ر٦٥	١ر٨٥
الحد الأدنى للطاقة الحرة ، كيلووات - ساعة/متر٣	٠ر ٧	٠ر٨٤	٠ر٩٧	١ر١٦	١ر٣٠

أما في حالة تنقية ماء بحر ذي ملوحة أقل ، فإن الحد الأدنى للطاقة ينخفض بالتناسب مع الانخفاض في الملوحة S كما يمكن أن يُستدل من المعادلة (١٠) . ويعتمد المعامل A إلى حد ما على نسبة وجود الملح في الماء . والقيمة المعطاة هنا ترجع إلى مياه تحتوي على أملاح بنفس النسب كما هي في ماء البحر .

ملحق ٢ أ
الحد الأدنى لمتطلبات الحرارة

تمثل قِيم الطاقة في جدول (أ – ١) الطاقة الميكانيكية أو الكهربائية وليست الطاقة الحرارية ذات النوعية المنخفضة كمصدر للطاقة المستفادة نظرا لأن جزءاً من هذه الطاقة الحرارية فقط يمكن تحويله إلى طاقة ميكانيكية أو كهربائية ، بينما يمكن للطاقة الكهربائية أن تتحول كلياً إلى حرارة . ويُقدَّر الجزء الذي يمكن تحويله من الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية باستخدام محرك حراري مثالي (محرك كارنوت) والذي يعمل بين درجات الحرارة المطلقة T و T_0 لاستقبال الحرارة وطردها على التوالي ، بالآتي :

$$\text{Carnot efficiency } \eta = \frac{T - T_0}{T} \qquad (13)$$

حيث η هى كفاءة محرك كارنوت .

فعلى سبيل المثال ، بأخذ محرك حراري بخاري مثالي يعمل بين ١٣٠ درجة مئوية و ٣٠ درجة مئوية (٤٠٣٫٤ و ٣٠٣٫٤ درجة مطلقة ، على التوالي) فإن كفاءة محرك كارنوت تصبح ٠٫٢٤٨ . وبما أن حرارة تكثيف البخار عند درجة ١٣٠ مئوية هى ٥١٨٫٥ سعر حراري/كجم ، فإن كل طن متري من هذا البخار يمكنه على الأكثر إنتاج ٥١٨٥٠٠ × ٠٫٢٤٨ = ١٢٨٥٠٠ سعر شغل أي مايعادل ١٤٩ كيلو وات ساعة . أما المحركات البخارية العادية فهى لاتعمل طبقا لدورة كارنوت ، وهى غير مثالية ، وبالتالي تُنتج شغلا أقل من الشغل الذي ينتجه محرك كارنوت .

ونظراً لأن الحد الأدنى للطاقة الحرة اللازم لإنتاج متر مكعب واحد من الماء العذب من ماء بحر بمعدل ٥٠٪ استرجاع هو ٠٫٩٧ كيلووات – ساعة (انظر جدول أ – ١) ، فإن محركاً حرارياً مثالياً افتراضياً يعمل بين ١٣٠ و ٣٠ درجة مئوية ومتصلًا بمحطة تقطير مثالية ، يجب أن يُنتج ١٥٤ متراً مكعباً من الماء العذب لكل طن من البخار . أما عملياً ، فإن ١٠ متر مكعب من الماء العذب لكل طن من البخار تُعتبر إنتاجية جيدة ، نظراً لوجود فقد حراري نتيجة إجراء العملية بمعدل محدود بدلا من إجرائها بمعدل متناهي البطء في محطة حرارية مثالية .

ملحق ٣ أ
متطلبات الشغل للتقطير بالانضغاط

لحساب الشغل المبذول بضاغط أدياباتي ، دعنا نأخذ ضاغطاً من النوع الكابس ، ونضيف حدود الشغل جبريا في دورة كاملة . ولقد نوقش هذا الموضوع بالتفصيل في مرجع للديناميكا الحرارية تأليف ب . ف . دودج B.F.Dodge (انظر قائمة المراجع) . ويحسب الشغل المبذول في أي جزء من الدورة موجباً ، بينما يحسب الشغل المكتسب سالباً .

وبناء على ذلك يكون الشغل اللازم لضغط حجم من الغاز V_1 عند ضغط p_1 الى حجم V_2 عند ضغط p_2 هو

$$W_1 = \int_{V_2}^{V_1} p\, dV \qquad (V_2 < V_1) \tag{14}$$

ويبذل الغاز الشغل p_2V_2 عند صرفه عند الضغط المرتفع p_2 . وعندما تسحب كمية جديدة من الغاز عند الضغط المنخفض p_1 فإن الغاز يكتسب شغلا p_1V_1 وحيث إن الضغط الأدياباتي يرفع درجة حرارة الغاز فإن $p_1V_1 \neq p_2V_2$ ويكون الشغل المبذول بالضاغط في كل دورة كالتالي

$$W_c = \int_{V_2}^{V_1} p\, dV + p_2V_2 - p_1V_1 \tag{15}$$

ومن المبادىء العامة للرياضيات فإن

$$d(pV) = V\, dp + p\, dV \tag{16}$$

وبالتكامل من P_1 و V_1 إلى P_2 و V_2 نحصل على

$$p_2V_2 - p_1V_1 = \int_{V_1}^{V_2} p\, dV + \int_{p_1}^{p_2} V\, dp \tag{17}$$

ومن المعادلات (١٥) و (١٧) نحصل على

$$W_c = \int_{p_1}^{p_2} V\, dp \tag{18}$$

وتعطي العلاقة بين p و V في انضغاط أدياباتي بالآتي :

$$pV^k = p_1 V_1^k \quad (19)$$

حيث k هي النسبة بين الحرارة النوعية للغاز عند ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية للغاز عند حجم ثابت على التوالي ، وقيمة k لبخار الماء تعادل ١٫٣٢ .

بالتعويض عن V من معادلة (١٩) في التكامل بالمعادلة (١٨) نحصل على

$$W_c = p_1^{1/k} V_1 \int_{p_1}^{p_2} p^{-1/k}\, dp = \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (20)$$

هذه المعادلة تعطي قيمة دقيقة للشغل اللازم لضاغط أدياباتي مثالي . أما إذا كان الضاغط غير مثالي ، فإنه يجب أن تقسم قيمة W_c على كفاءة الضاغط ϵ والتي عادة ماتكون في حدود ٠٫٧٥ .

ونظرا لأن نسبة الانضغاط والتي يُرمز لها بالرمز $r = P_2/P_1$ تكون في حدود الواحد الصحيح في حالة التقطير بالانضغاط فإنه يمكن تبسيط المعادلة (٢٠) – بعد التجاوز عن قدر ضئيل من الدقة – بالتعويض بكثيرة الحدود بدلا من الدالة الأسية كمايلي

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = \left(1 + \frac{p_2 - p_1}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = 1 + \frac{k-1}{k} \left(\frac{p_2 - p_1}{p_1} \right) \quad (21)$$

وعليه تصبح المعادلة (٢٠)

$$W_c = (p_2 - p_1) V_1 = p_1 (r-1) V_1 = \frac{p_1 V_1 (r^2 - 1)}{r+1} \quad (22)$$

فإذا كانت نسبة الانضغاط صغيرة (أي قريبة من الواحد الصحيح) ، فيمكن استبدال $(r + 1)$ في المقام بالقيمة $2r$ وتصبح المعادلة (٢٢) كمايلي

$$W_c = p_1 V_1 \frac{r^2 - 1}{2r} = RT_1 \frac{r^2 - 1}{2r} \quad (23)$$

والمعادلة (٢٣) ماهي إلا تقريب للمعادلة (٢٠) ، وتعطي المعادلة (٢٣) قيمة W_c بخطأ لايزيد عن ٢٪ بشرط ألا تزيد نسبة الانضغاط r عن ١٫٢ .

فعلى سبيل المثال ، يمكن تطبيق المعادلة (٢٣) على ماء بحر بتركيز مضاعف ، يغلي عند درجة حرارة قدرها ١٠١٫٠٥ مئوية . وبالتعويض في المعادلة (٢٣) بالقيم R = ٢٫٣١ × ١٠^-٦ كيلووات ساعة لكل درجة مئوية لكل جزئ جرامي و T = ٣٧٤٫٤ درجة مطلقة ، وباعتبار أن ١

متر مكعب من الماء يحتوي على ٥٥ر٥ × ١٠^٣ جزىء جرامي ، فإن الشغل اللازم لإنتاج ١ متر مكعب من الماء بهذه الطريقة يصبح

$$W_c = 24.0 \times \frac{r^2 - 1}{r} \text{ kwhr/m}^3 \quad (24)$$

وحيث إن ضغط بخار الماء الملح المغلي هو ١ ضغط جوي عند هذه الدرجة من الحرارة ، فإن نسبة الانضغاط r تصبح عددياً مساوية لقيمة الضغط (بالجوي) الموجود في الأنابيب التي يتكثّف فيها البخار . ويمكننا رسم العلاقة بين W_c مع هذا الضغط أو مع درجة حرارة تكثُّف البخار المناظرة لهذا الضغط ؛ والعلاقة الأخيرة هذه موضحة في شكل (٥ — ١٢) لضاغط ذي كفاءة ميكانيكية تامة .

ويرسم الخط من درجة حرارة غليان الماء الملح (١٠١٫٠٥ درجة مئوية) إلى درجات حرارة أعلى . ومن الواضح أنه حتى عند درجة حرارة قدرها ١٠١٫٠٥ مئوية ، فإن شغل الانضغاط الأدياباتي يزيد عن الشغل النظري اللازم لإزالة الملوحة والذي يعادل ٢٣ر١ كيلووات ساعة/متر^٣ عند هذه الدرجة من الحرارة (محسوب من المعادلة رقم ١٠) ، وذلك بسبب أن الانضغاط الأدياباتي يُنتج حرارة أكبر من المقدار المطلوب لرفع درجة حرارة الأبخرة إلى ١٠١٫٠٥ درجة مئوية . أما عمليا ، فإن هذه الزيادة في الحرارة تُعوِّض الفاقد الحراري أثناء إجراء العملية ، مثل الحرارة المفقودة مع الهواء المنزوع من الوحدة ، ومع الماء الملح ومع الماء المقطر الناتج اللذين يخرجان من الوحدة عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة التغذية ، بالاضافة إلى التعويض عن الفقد في الحرارة من خلال العازل الحراري . ومن الناحية النظرية ، فإن هذه التأثيرات لاتُمثِّل فقداً حراريا فحسب ، وإنما تمثل خفض نوعية الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية .

ملحق ٤ أ
العلاقة بين التبخير وفقد الحرارة نتيجة دوران الهواء في مقطر شمسي

عندما يتبخر الماء الملح في مقطر شمسي ، فإن الأبخرة تنتقل إلى الغطاء الزجاجي الأبرد نسبياً نتيجة الحركة المضطربة للهواء الناشئة عن فرق درجات الحرارة بين الماء الملح والزجاج . ويؤدي تحسين دوران الهواء في المقطر إلى زيادة كمية البخار المنتقلة من الماء الملح إلى الغطاء ، أي القطارة ، وإلى زيادة الفقد في الحرارة المنقولة كحرارة محسوسة في نفس الاتجاه (أي من الماء الملح إلى الغطاء) . وفي الواقع ، فإنه حتى إذا لم يكن هناك حمل حراري على الإطلاق ، وكانت كلتا الظاهرتين موجودتين فقط نتيجة الانتشار البطيء ، فإنهما سوف يزيدان وينقصان معاً . والعلاقة بين هاتين العمليتين تُعطي بنسبة الحرارة المنقولة بالحمل إلى الحرارة المنقولة بالتبخير . وتقدر هذه النسبة بالقيمة التالية :

$$\frac{\text{heat carried by convection}}{\text{heat carried by evaporation}} = J\frac{T_W - T_A}{P_W - P_A}\frac{P}{760} \qquad (25)$$

حيث T_W و T_A هي درجات الحرارة (بالدرجة المئوية) و P_W و P_A هي الضغوط الجزئية لبخار الماء في طبقاتِ التشبع الملامسة مباشرة للماء الملح وللزجاج ، على التوالي ، و P هي الضغط البارومتري (جميع الضغوط بالمليمتر زئبق) . وتعتمد J إلى حد ما على الحركة المضطربة للهواء ، ولكنها تتغير في حدود ضيقة ويمكن أن تؤخذ حوالي ٤٦ر. للتبخير الحر في المقطر الشمسي .

والعلاقة مابين الحرارة المنقولة بالحمل وبالتبخير ، على التوالي ، عرفت منذ مدة طويلة ، ولقد استخدمت هذه العلاقة عمليا في قياس الرطوبة بطريقة البصيلة المخضّلة والجافة . ووجهة نظر علم الطبيعة في هذا الموضوع يمكن الاطلاع عليها في مقالة بتأليف أ . س . بوين* . وتلعب هذه النسبة أيضا دوراً هاماً في علم المحيطات** .

★ I.S. Bowen, "The Ratio of Heat Loss by Conduction and by Evaporation from any Water Surface" (*Phys. Rev.* 27 B: 779, 1926).

★★ H.U. Sverdrup, *Oceanography of Meteorologists,* Allen and Unwin, London, 1945, p.63.

ملحق ٥ أ
خواص أغشية التبادل الأيوني

يبين الجدول (أ - ٢) قيما تقريبية لخواص أغشية التبادل الأيوني . وللحصول على قائمة مطولة بأسماء وعناوين شركات عديدة تقوم بتصنيع هذه الأغشية ، يمكن الرجوع إلى الفصل الخاص بالديلزة الكهربائية في كتاب *Principles of Desalination* تأليف **L.H.Shaffer and M.S.Mintz** والذي نشرته دار أكاديميك برس ، عام ١٩٦٦ ، ص ص ٢١٠ - ٢١١ .

ويُعرَّف رقم نقل الأيون العكسي بأنه ذلك الجزء من التيار المحمول بهذا الأيون . أما الأيون العكسي فيُعرَّف بأنه الأيون الموجب والأيون السالب في الأغشية الكاتيونية والأنيونية ، على التوالي . أما الجزء الباقي من التيار فيُحمل بكمية صغيرة من الأيونات المتنقلة ذات الشحنة المعاكسة في الغشاء . ونظراً لأن الغشاء يجب أن يمنع أكبر قدر ممكن من الأيونات من النوع الثاني ، فإن رقم نقل الأيونات المعاكسة في غشاء أيوني انتقائي جيد يجب أن يكون قريباً الى الواحد الصحيح . وعندما يوضع الغشاء في محاليل مركزة ، وفي العادة لايحدث هذا ، فإن بعض الأغشية تُحافظ على نفاذيتها الانتقائية المرتفعة للأيونات الموجبة أو للأيونات السالبة . ولقد تطورت هذه الأغشية أساساً لتركيز الملح من ماء البحر بدلا من إنتاج ماء عذب ، ويقارن هذا الوضع بالمشاكل الموجودة في صناعة البحر الميت بفلسطين المحتلة حيث يكون الملح بصفة أساسية نفاية ، بينما يكون الماء العذب هو المطلوب إنتاجه .

ويُقاس تركيز الأيونات العكسية بسعة التبادل . وعند ثبات المتغيرات الأخرى ، فإن انتقائية الغشاء تزيد بزيادة سعة التبادل . وبالوحدات العملية ، تستخدم مقاومة وحدة المساحة في تقدير قيمة الفقد الأومي في الغشاء .

وتدل بيانات نقل المياه على كمية الماء المحمولة بالأيونات ويشار في العادة إلى هذه الظاهرة بالتناضح الكهربائي .

ويعرف جهد الغشاء بأنه فرق الجهد المقاس بين قطبي كالوزميل **calomel** موضوعين في محلولين بتركيزين مختلفين ومفصولين بالغشاء . ويعتمد جهد الغشاء على درجة النفاذ الانتقائي للأغشية ويلزم أن يكون أقرب مايمكن لأقصى قيمة نظرية وهي ٠,٠٥٩ فولت عند درجة ٢٥ مئوية للمحاليل الموضحة بالجدول . وفي العادة ، تستخدم القياسات المعملية لجهد الأغشية لفحص

جدول أ – ٢
بعض خواص أغشية التبادل الأيوني للديلزة الكهربائية

الخاصيــة	المدى (لقيمة الخاصية)	ملاحظات
السمك	١ر٠ – ٧ر٠ مليّمتر	
مقاومة التمزق*	٥٠ – ١٥٠ رطل على البوصة المربعة**	تحدد المقاومة للتغير المفاجىء للضغط
الوزن النوعي	١ر١ – ٨ر١	
رقم نقل الأيون العكسي	٩ر٠ – ٩٩ر٠ في محلول من كلوريد الصوديوم العياري (٥٨٤٥ جزء في المليون كلوريد صوديوم)	تعتمد على تركيز المحلول الملامس للغشاء
سعة التبادل	٥ر٠ – ٠ر٢ مليّمكافىء لكل جرام مبلل من الغشاء	
مقاومة وحدة المساحة	١ – ١٠ أوم سم٢	في محلول يحتوي على ٦٠٠ جزء في المليون ملح
محوى الماء	٢٠ – ٥٠٪	
نقل الماء	٠١ر٠ – ٦ر٠ مل/سم٢ ساعة عند كثافة تيار ١٠ مليأمبير/سم٢	
جهد الغشاء	حوالي ٠٥٥ر٠ فولت لكل غشاء	لمحاليل من ٥٠٠٠ و ٥٠٠ جزء في المليون كلوريد صوديوم عند طرفي الغشاء عند ٢٥° م

المنتجات الجديدة من الأغشية من حيث نفاذيتها الانتقائية إذ إن هذه القياسات سريعة ومبسطة . وعموما ، فإنه يُفضل عند التنبؤ بأداء الأغشية في المحطات أن يختبر رقم نقل الأيونات المعاكسة في خلية معملية تحت تأثير التيار ولايصح الاعتماد على نتائج جهد الغشاء بمفردها .

* مقاسة بجهاز ميولن Mullen لاختبار مقاومة التمزق . الجمعية الأمريكية لاختبار المواد ، المنهج D 774 .

** ١ رطل على البوصة المربعة = ٠٧٠٣ر٠ كجم/سم٢.

ملحق ٦ أ
استخدام الحرارة لتوليد برودة

لحساب كمية الحرارة المأخوذة من بخار مشبع واللازمة لنقل ١ سعر من مكان مبرد عند درجة T_2 إلى درجة الحرارة المحيطة T_0 ، فإنه يلزم اعتبار محركين مثاليين ، احدهما مبرد يستهلك طاقة ميكانيكية قدرها W والآخر مولد للقدرة يتم تبريده بالمياه عند درجة الحرارة المحيطة ويولد الطاقة الميكانيكية W اللازمة لتشغيل المبرد (انظر معالجة ب . ف دودج B.F. Dodge لهذا الموضوع) . وتشير كلمة مثالي إلى تشغيل انعكاسي تام حيث درجة الحرارة تقاس بالدرجة المطلقة . ومن المعتاد أن يطلق على نقل الحرارة من درجة حرارة منخفضة إلى أخرى مرتفعة ضخ الحرارة . ويلاحظ أن الحرارة المنقولة عند درجة الحرارة المرتفعة تزيد (بمقدار الشغل المبذول في الضاغط) عن كمية الحرارة المنقولة عند درجة الحرارة المنخفضة .

ويقدر الشغل اللازم للمبرد لضخ ١ سعر كمايلي

$$W = \frac{T_0 - T_2}{T_2} \tag{26}$$

ويقدر الشغل الناتج من مولد القدرة الذي يستخدم حرارة قدرها Q_1 سعر من بخار مشبع عند درجة T_1 بالآتي

$$W = Q_1 \frac{T_1 - T_0}{T_1} \tag{27}$$

(وتعطي كل من W و Q_1 بالسعر .)

وتصبح كمية الحرارة المأخوذة من البخار Q_1 لكل سعر يتم ضخه للتبريد هي

$$Q_1 = \frac{T_1}{T_2}\left(\frac{T_0 - T_2}{T_1 - T_0}\right) \tag{28}$$

فعلى سبيل المثال ، إذا أخذنا درجات حرارة البخار ، وماء التبريد والمكان المبرد هي على التوالي ١٠١°م ، ١٨°م ، – ٣°م ، فإن Q_1 تصبح ٠٫٣٥ سعر ، أي أن ١ سعر حراري من البخار يمكنه سحب ٢٫٨٥ سعر من المكان المبرد .

ويلاحظ أن أية آلة تبريد انعكاسية مثالية أخرى ، مثل مبرد الامتصاص المثالي الافتراضي ، يلزم أن يكون لها نفس الكفاءة عندما تعمل عند هذه الدرجات من الحرارة .

ملحق ٧ أ
وسائل التعبير عن تركيز الملح في ماء البحر

تعريفات

الملوحة : الكمية الكلية للمواد الصلبة (بالجرام) لكل كيلو جرام من ماء البحر بعدما تتحول كل الكربونات الى أكسيد ، ويستبدل البروميد واليوديد بالكلوريد ، وتتأكسد جميع المواد العضوية كليا .

الكلورية : الكمية الكلية من الكلور (بالجرام) الموجودة في ١ كيلو جرام من ماء البحر بعد مايستبدل كل البروميد واليوديد بالكلوريد .

الكلوروزية : الكمية الكلية من الكلور (بالجرام) الموجودة في ١ لتر من ماء البحر عند درجة ٢٠ م بعد مايستبدل كل البروميد واليوديد بالكلوريد .

هذه التعريفات للكلورية والكلوروزية لاتنطبق إلا على ماء المحيطات العادي ، أو المركز ، أو المخفف ، ولايمكن تطبيقها على أنواع الماء الأخرى .

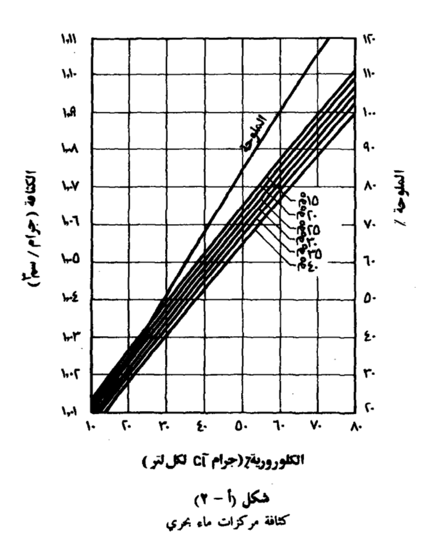
والعلاقة التجريبية بين الكلورية والملوحة في ماء البحر هى :

الملوحة = ٣٠ر٠ + ٨٠٥ر١ × الكلورية

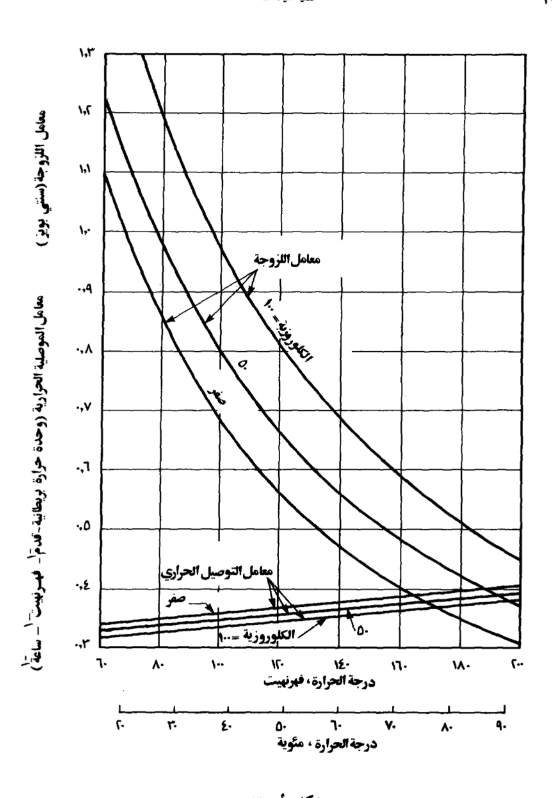
ملحق ٨ أ
خواص مركزات ماء البحر المختلفة

توضح الأشكال (أ – ٢) الى (أ – ٤) عددا من الخواص الهامة لماء البحر . ولقد أُعدت المركزات من ماء بحري بالتبخير دون ترسيب للاملاح . ولقد أخذت هذه البيانات من المرجع الآتي :

"Critical Review of Literature on Formation and Prevention of Scale," by W.L. Badger *et al.* (Office of Saline Water Research and Development Report No.25, U.S. Department of the interior, Washington, D.C., 1959).

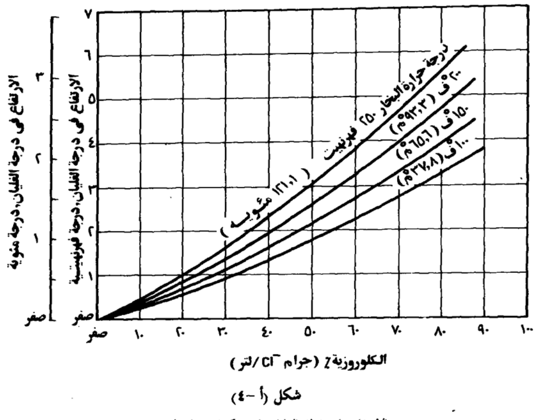


شكل (أ – ٢)
كثافة مركزات ماء بحري



شكل (أ - ٣)

معامل اللزوجة ومعامل الموصلية الحرارية في مركزات ماء البحر



شكل (أ -٤)

الارتفاع في نقطة الغليان في مركزات ماء البحر

وللحصول على بيانات تفصيلية عن العديد من خواص ماء البحر وتركيزاته ولمحاليل كلوريد الصوديوم والأملاح الأخرى الموجودة في ماء البحر ، يمكن الرجوع إلى ماكتبه ب . فابوس B.Fabuss في كتاب *Principles of Desalination, 2nd* ed. (Academic Press, New York) بالإضافة الى المرجع التالي ***Saline Water Conversion Engineering Data Book*** والذي أعدته شركة م . و . كيلوج .M.W. Kellogg, Co بنيويورك في عام ١٩٦٥ لصالح مكتب المياه الملحة التابع لوزارة الداخلية الامريكية (يتم البيع بوساطة .Superintendent of Documents, Washington, D.C 20402) وهناك الكثير من البيانات الحديثة يمكن الرجوع إليها في المرجع الآتي :

"Thermodynamic Properties of Sea Salt Solutions," by L.A. Bromley, D. Singh, P.Ray, S. Sridhar and S.M. Read *(Journal of American Institute of Chemical Engineers,* **20**:326, 1974).

ملحق ٩ أ
معاملات تحويل

جدول تحويل الوحدات

لتحويل بيانات معطاة لهذه الوحدة	إلى هذه الوحدة	اضرب في المعامل
بوصة زئبق (عند الصفر المئوي)	جوي (وحدة الضغط)	٠٫٠٣٣٤٢١
بوصة	سنتيمتر	٢٫٥٤
جالون (أمريكي)	لتر	٣٫٧٨٥٣
جالون (أمريكي)	جالون (امبريال)	٠٫٨٣٢٦٨
جالون (امبريال)	جالون (أمريكي)	١٫٢٠٠٩
جرام	حبة	١٥٫٤٣٢٤
جرام/لتر	جزء في المليون	١٠٠٠
جوي (وحدة الضغط)	سنتيمتر زئبق (عند درجة الصفر المئوي)	٧٦٫٠٠
جوي	بوصة زئبق (عند درجة الصفر المئوي)	٢٩٫٩٢١
جوي	رطل لكل بوصة مربعة	١٤٫٦٩٦
حبة	جرام	٠٫٠٦٤٧٩
حصان (وحدة قدرة)	كيلو وات	٠٫٧٤٥٧
رطل	كيلو جرام	٠٫٤٥٣٦
رطل/بوصة مربعة	جوي	٠٫٠٦٨٠٥
سنتيمتر	بوصة	٠٫٣٩٣٧
سنتيمتر	قدم	٠٫٠٣٢٨١
سنتيمتر زئبق	جوي	٠٫٠١٣١٦
سعر	كيلو وات — ساعة	٠٫٠٠١١٦٢٨
سعر	جول (مطلق)	٤١٨٦
سعر/كجم	وحدة حرارة بريطانية/رطل	١٫٨

(تابع) جدول تحويل الوحدات

لتحويل بيانات معطاة لهذه الوحدة	الى هذه الوحدة	اضرب في المعامل
طن* (متري)	طن (قصير)	١٫١٠٢٣
طن (قصير)	طن (متري)	٠٫٩٠٧٢
فدان (أمريكا – بريطانيا)	متر مربع	٤٠٤٦٫٩
فدان – قدم	جالون (أمريكي)	٣٢٥٨٥٠
فدان – قدم	متر مكعب	١٢٣٣٫٥
قدم مكعب	لتر	٢٨٫٣١٦
قدم	سنتيمتر	٣٠٫٤٨
كيلو جرام	رطل	٢٫٢٠٤٦
كيلو متر	ميل (انجليزي)	٠٫٦٢١٣٧
كيلو متر	ياردة	١٠٩٣٫٦
كيلو وات	حصان	١٫٣٤١٠
كيلو وات – ساعة	وحدة حرارة بريطانية	٣٤١٣
كيلو وات – ساعة	جول (مطلق)	$٣٫٦ \times ١٠^{-٦}$
كيلو وات – ساعة	سعر	٨٦٠
كيلو وات – ساعة	لتر – جوي	٣٥٥٢٤
كيلو متر مربع	فدان	٢٤٧٫١٠
لتر	جالون (أمريكي)	٠٫٢٦٤١٨
لتر – جوي	كيلو وات – ساعة	$٢٫٨١٥ \times ١٠^{-٥}$
لوغاريتم للأساس ١٠ (log)	لوغاريتم للأساس e (ln)	٢٫٣٠٢٦
لوغاريتم للأساس e (ln)	لوغاريتم للأساس ١٠ (log)	٠٫٤٣٤٣
متر مكعب	فدان – قدم	$٨٫١٠٧ \times ١٠^{-٤}$
متر مكعب	جالون (امبريال)	٢٢٠
متر مكعب	جالون (أمريكي)	٢٦٤٫١٧
متر	قدم	٣٫٢٨٠٨

* كل القيم المستخدمة للطن في هذا الكتاب تشير إلى الطن المتري مالم يذكر خلاف ذلك .

(تابع) جدول تحويل الوحدات

لتحويل بيانات معطاة لهذه الوحدة	إلى هذه الوحدة	اضرب في المعامل
متر	ياردة	١٫٠٩٣٦
ميل (أمريكي)	كيلو متر	١٫٦٠٩٤
متر مربع	قدم مربع	١٠٫٧٦٤
وحدة حرارة بريطانية	سعر	٠٫٢٥١٩٨
وحدة حرارة بريطانية	كيلو وات . ساعة	٢٫٩٣٠ × ١٠⁻⁴
وحدة حرارة بريطانية/رطل	سعر/كيلو جرام	٠٫٥٥٥٦
ياردة	متر	٠٫٩١٤٤

معاملات تحويل لوحدات التركيز*

لتحويل قيمة التركيز من هذه الوحدة	الى هذه الوحدة	اضرب في المعامل
جزء في المليون كالسيوم Ca	جزء في المليون $CaCO_3$	٢٫٤٩٥
جزء في المليون مغنسيوم Mg	جزء في المليون $CaCO_3$	٤٫١١٢
جزء في المليون صوديوم Na	جزء في المليون $CaCO_3$	٢٫١٧٤
جزء في المليون بوتاسيوم K	جزء في المليون $CaCO_3$	١٫٢٧٩
جزء في المليون كلور Cl	جزء في المليون $CaCO_3$	١٫٤١٠
جزء في المليون كبريتات SO_4	جزء في المليون $CaCO_3$	١٫٠٤٢
جزء في المليون بيكربونات HCO_3	جزء في المليون $CaCO_3$	٠٫٨١٩
جزء في المليون كلوريد صوديوم NaCl	جزء في المليون $CaCO_3$	٠٫٨٥٥
جزء في المليون كربونات كالسيوم $CaCO_3$	جزء في المليون NaCl	١٫١٦٩

(*) يتم تعديل التركيزات لجميع الأيونات والاملاح الموجودة فى المحلول إلى $CaCO_3$ للحصول على مرجع مشترك لها جميعا . فمثلا قيمة ٥٠ جزء فى المليون $CaCO_3$ تعادل ١ مليمكافىء لكل لتر . وعليه ، يمكن التعبير عن ١٢٫٢ مجم Mg، و٢٠ مجم Ca، و٥٨٫٥ مجم NaCl بالقيمة المكافئة ٥٠ مجم $CaCO_3$ ، لأن جميعها تمثل ١ مليمكافىء من الأنواع المعنية ، ويلاحظ عموما أن هذا يمثل مقياسا مناسباً لايمكن مخالفته ، إذ إنه عمليا لايمكن إذابة $CaCO_3$ كيميائيا فى الماء النقى . ويلاحظ أيضا أنه من المعتاد أن يؤخذ الوزن المكافىء لمادة $CaCO_3$ بالرقم الصحيح ٥٠ بالرغم من كون الرقم الدقيق هو ٥٠٫٠٤ . المعاملات المدرجة بالجدول هى حاصل قسمة ٥٠ على الوزن المكافىء للأيونات المعنية ، ولمزيد من التفاصيل عن الاتزان الأيونى فى المياه الطبيعية يمكن الرجوع إلى

★ *Aquatic Chemistry* by W. Stumn and J.H. Morgan, Interscience, New York, 1970.

تحويل وحدات درجات الحرارة

للتحويل من درجة مئوية (°م) إلى درجة فهرنهيت (°ف) اضرب في ٨ر١ ثم أضف ٣٢ .
للتحويل من درجة فهرنهيت (°ف) إلى درجة مئوية (°م) اطرح ٣٢ ثم اقسم على ٨ر١ .
الدرجة المئوية المطلقة (تسمى أيضا درجة كلفن) = درجة مئوية + ٢ر٢٧٣
الدرجة الفهرنهيت المطلقة = درجة فهرنهيت + ٤٦٠

الكشاف

ن

هـ

و

ى

ثبت المصطلحات

عربي/إنجليزي

أ

أدياباتي	adiabatic
إزالة العسر – تيسير	softening
إزالة المعادن	demineralization
إزالة الملوحة	desalting
الأس الهيدروجيني	pH
استخلاص المذيب	solvent extraction
استرات الجلايكول عديد الألكيلين	esters of polyalkylene glycols
استرجاع	recovery
أسيتات السليولوز	cellulose acetate
إشعاع	radiation
إشعاع شمسي	solar radiation
إعذاب – إزالة الملوحة	desalination
إعذاب	desalting
إلكترود (قطب)	electrode
إلكتروليت (محلول كهربي)	electrolyte
ألياف مجوفة	hollow fibers
أمين ثلاثي الإثيل	Triethylamine
أنابيب مخددة	fluted tubes
انضغاط	compression
انعكاسي	reversible
انعكاسية	reflectivity
أنيون (أيون سالب)	anion
أيون عكسى	counterion
أيون	ion

ب

بخار ماء	water vapour
بخار ماء مغلى	steam
بخار محمى	superheated steam
بيرليومتر (مقياس قوة حرارة الاشعاع الشمسى)	pyrheliometer

ت

تآكل	corrosion
تأثير دونان	Donnan effect
تبادل أنيوني	anion exchange
تبادل أيوني	ion exchange
تبخير شمسى	solar evaporation
تبريد بالامتصاص	absorption refrigeration
تبريد بالانضغاط	compression refrigeration
تحلل مائى	hydrolysis
تخثير	coagulation
تركيز	concentration
تغذية مرتدة	feedback
تقطير	distillation
تقطير أحادي التأثير	single-effect distillation
تقطير بالتلامس المباشر	direct contact distillation
تقطير الضغط الحرج	critical-pressure distillation
تقطير بانضغاط البخار – تقطير	vapour-compression

بالانضغاط distillation
تقطير فجائي flash distillation
تقطير متعدد التأثيرات multiple-effect distillation
تكثف فيلمي film condensation
تكثف متقاطر dropwise condensation
تكون القشور (تقشّر) scale formation
تميؤ (هيدرات) hydrate
تناضح أيوني osmionis
تناضح عكس reverse osmosis
تناضح كهربائي electroosmosis
تنقية purification
تهوية aeration
تيسير – إزالة عسر softening

ث

ثلاثي عديد فوسفات الصوديوم sodium tripolyphosphate

ج

جهد الاستقطاب polarization voltage
جهد الغشاء membrane potential
جهد كيميائي chemical potential

ح

حاصل الضرب الأيوني ionic product
حالة الاستقرار – حالة الثبات steady state
حد الذوبانية solubility limit
حرارة التبخير heat of vaporization
حرارة كامنة latent heat
حرارة محسوسة sensible heat
حرارة نوعية specific heat
حراري أرضي geothermal
حمأة sludge
حمض الدوباليك humic acid
حمل حراري heat convection

خ

خانق throttle
خزان فصل الطور phase separation tank

د

درجة التركيز degree of concentration
دليل الانسداد plugging index
دليل التشبع saturation index
دليل القدرة power index
دورة ثنائية الموائع binary fluid cycle
دورة كارنوت Carnot cycle
ديلزة كهربائية electrodialysis
دينامي – ديناميكي . dynamic

ذ

ذوبانية solubility

ر

راديومتر (مقياس الإشعاع) radiometer

رطوبة	humidity

س

سائل غليظ القوام	slurriy
سريان	flow
سريان معاكس	counter flow
سريان موازٍ	parallel flow
سعة التبادل	exchange capacity
سلفوني	sulfonic

ش

شبه مُنفذ	semipermeable
شغل	work

ض

ضاغط	compressor
ضغط	pressure
ضغط البخار	vapour pressure
ضغط البخار المتعادل	equilibrium vapour pressure
ضغط التناضح	osmotic pressure

ط

طارد بخاري	steam ejector
طاقة	energy
طاقة مستفادة – طاقة متاحة	available energy (exergy)
طور	phase

ع

عامل إزباد	frothing agent
عامل منع البلل	antiwetting agent
عسر الماء	water hardness
عملية زارشين	Zarchin process
عملية التفريغ والتبخير الفجائي	vacuum-flash process

غ

غشاء	membrane
غشاء كلوديون	collodion membrane
غير مستقر	unstable

ف

فصل كروماتوجرافي	chromatographic separation
فعالية – نشاط	activity
فوسفات ثنائية الصوديوم	disodium phosphate
فوق المشبع	supersaturated

ق

قدرة	power
قشور	scales
قُطارة – ماء ناتج بالتقطير	distillate
قُطب	electrode

قِلْوية — alkalinity

ك

كاتيون (أيون موجب) — cation
كاربوكسيلي — carboxylic
كفاءة — efficiency
كلوروزية — chlorosity
كَلْوَرِية — chlorinity
كيلوحَبَّة — kilograin

ل

لف حلزوني — spiral-wound

م

ماء أَخْضَم — brackish water
ماء حمضي — acid water
ماء ملح — brine
ماص — absorber
مائع — fluid
مبخر — evaporator
مبخر الانضغاط الحراري — thermocompression-evaporator
مبخر مسح الطبقة الرقيقة — wipe film evaporator
مبرد — refrigerant
مبلور — crystallizer
مُجمِّد — freezer
محتوى الماء — water content
محرك كارنوت — Carnot engine
محطة ثنائية الغرض — dual purpose plant
محلول كهربائي – إلكتروليت — electrolyte
محلول متعدد الألكتروليتية غير العضوية — inorganic polyelectrolyte
مُسترجع — regenerator
مُسْتَرطِب — hygroscopic
مِصْفَق (وعاء لترويق السائل) — decanter
مُصهِر — melter
مُعالجة — treatment
معالجة مسبقة — pretreatment
مُقاومة حرارية — thermal resistance
مِقطَر — still
مِقطَر انضغاط — compression still
مِقطَر شمسي ذو حوض عميق — deep-basin solar still
مُكثِّف — condenser
ملوحة — salinity
مُنْصل بخاري — steam stripper
منع تكوُّن القشور — scale prevention
مُوصليَّة حرارية — thermal conductivity

ن

ناتج — yield
ناتج الذوبانية — solubility product
نازع الهواء — deaerator
نافِخ — blower
نسبة الأداء — performance ratio
نسبة الانضغاط — compression ratio
نِظام — system

solar evaporation تبخير شمسي
solar radiation إشعاع شمسي
solubility ذوبانية
solubility limit حد الذوبانية
solubility product ناتج الذوبانية
solvent extraction استخلاص المذيب
specific heat حرارة نوعية
spiral-wound لف حلزوني
steady state حالة الاستقرار – حالة الثبات
steam بخار ماء مغلي
steam ejector طارد بخاري
steam strippers مُنْصِل بخاري
still مِقْطَر
sulfonic سلفوني
superheated steam بخار مُحمَّى
supersaturated فوق المشبع
system نظام

t

thermal conductivity موصلية حرارية
thermal resistance مقاومة حرارية
thermocompression evaporator مبخر الانضغاط الحراري
throttle خانق
treatment مُعالجة
triethylamine أمين ثلاثي الإثيل

u

unstable غير مُستقر

v

vacuum-flash process عملية التفريغ والتبخير الفجائي
vapour-compression distillation تقطير بانضغاط البخار – تقطير بالانضغاط
vapour pressure ضغط البخار

w

water content محتوى الماء
water hardness عسر الماء
water vapour بخار ماء
wipe film evaporator مُبخِّر مسح الطبقة الرقيقة
work شُغْل

y

yield ناتج

z

Zarchin process عملية زارشين

دليل القدرة	power index
ضغط	pressure
مُعالجة مسبقة	pretreatment
تنقية	purification
بيْرليومتر (مقياس قوة حرارة الإشعاع الشمسي)	pyrheliometer

r

إشعاع	radiation
راديومتر (مقياس الإشعاع)	radiometer
استرجاع	recovery
انعكاسية	reflectivity
مُبرِّد	refrigerant
مُستَرجِع	regenerator
تناضح عكسي	reverse osmosis
انعكاسي	reversible

s

ملوحة	salinity
دليل التشبع	saturation index
قشور	scale
تكوُّن القشور (تقشر)	scale formation
منع تكوُّن القشور	scale prevention
شبه مُنفِذ	semipermeable
حرارة محسوسة	sensible heat
تقطير أحادي التأثير	single-effect distillation
حمأة	sludge
سائل غليظ القوام	slurry
ثلاثي عديد فوسفات الصوديوم	sodium tripolyphosphate
تيسير – إزالة عسر	softening

k

كيلوحبة	kilograin

l

حرارة كامنة	latent heat

m

مُصَهِر	melter
غِشاء	membrane
جُهد الغشاء	membrane potential
تقطير متعدد التأثيرات	multiple-effect distillation

o

تناضح أيوني	osmionis
ضغط التناضح	osmotic pressure

p

سريان موازٍ	parallel flow
نسبة الأداء	performance ratio
الأس الهيدروجيني	pH
طَوْر	phase
خزان فصل الطور	phase separation tank
دليل الانسداد	plugging index
جهد الاستقطاب	polarization voltage
قدرة	power

degree of concentration	درجة التركيز
demineralization	إزالة المعادن
desalination	إعذاب – إزالة ملوحه
desalting	إزالة ملوحة – إعذاب
direct contact distillation	تقطير بالتلامس المباشر
disodium phosphate	فوسفات ثنائية الصوديوم
distillate	قطارة – ماء ناتج بالتقطير
distillation	تقطير
Donnan effect	تأثير دونان
dropwise condensation	تكثف متقاطر
dual purpose plant	محطة ثنائية الغرض
dynamic	دينامي – ديناميكي

e

efficiency	كفاءة
electrode	إلكترود (قطب)
electrodialysis	دَيْلَزة كهربائية
electrolyte	إلكتروليت (محلول كهربائي)
electroosmosis	تناضح كهربائي
energy	طاقة
equilibrium vapour pressure	ضغط البخار المتعادل
esters of polyalkylene glycols	إسترات الجلايكول عديد الألكيلين
evaporator	مُبخِّر
exchange capacity	سعة التبادل
exergy (available energy)	طاقة مستفادة – طاقة متاحة

f

feedback	تغذية مرتدة
film condensation	تكثف فيلمي
flash distillation	تقطير فجائي
flow	سريان
fluid	مائع
fluted tubes	أنابيب مخددة
freezer	مُجمِّد
frothing agent	عامل إزباد

g

geothermal	حراري أرضي

h

heat convection	حِمْل حراري
heat of vaporization	حرارة التبخير
hollow fibers	ألياف مجوفه
humic acid	حمض الدوباليك
humidity	رطوبة
hydrate	تميُّؤ (هيدرات)
hydrolysis	تحلل مائى
hygroscopic	مُستَرطِب

i

inorganic polyelectrolyte	محلول متعدد الإلكتروليتية غير العضوية
ion	أيون
ion exchange	تبادل أيوني
ionic product	حاصل الضرب الأيوني

إنجليزي/عربي

a

absorber	ماص
absorption refrigeration	تبريد بالامتصاص
acid water	ماء حمضي
activity	فعالية – نشاط
adiabatic	أدياباتي
aeration	تهوية
alkalinity	قلوية
anion	أنيون (أيون سالب)
anion exchange	تبادل أنيوني
antiwetting agent	عامل منع البلل
available energy (exergy)	طاقة مستفادة – طاقة متاحة

b

binary fluid cycle	دورة ثنائية الموائع
blower	نافخ
brackish water	ماء أخضَم
brine	ماء مِلح

c

carboxylic	كربوكسيلي
Carnot cycle	دورة كارنوت
Carnot engine	محرك كارنوت
cation	كاتيون (أيون موجب)
cellulose acetate	أسيتات السليولوز
chemical potential	جهد كيميائي
chlorinity	كلْوَرِيَّة
chlorosity	كلوروزِيَّة
chromatographic separation	فصل كروماتوجرافي
coagulation	تخثير
collodion membrane	غشاء كلوديون
compression	انضغاط
compression ratio	نسبة الانضغاط
compression refrigeration	تبريد بالانضغاط
compression still	مقطر انضغاط
compressor	ضاغط
concentration	تركيز
condenser	مكثف
corrosion	تآكل
counter flow	سريان معاكس
counterion	أيون عكسي
critical-pressure distillation	تقطير الضغط الحرج
crystallizer	مُبَلْوِر

d

deaerator	نازع الهواء
decanter	مِصْفَق (وعاء لترويق السائل)
deep-basin solar still	مِقْطر شمسي ذو حوض عميق



مطابع جامعة الملك عبدالعزيز